

ISSN 0044-3948

ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

КОСМОНАВТИКА
АСТРОНОМИЯ
ГЕОФИЗИКА

СЕНТЯБРЬ–ОКТЯБРЬ

5/2016

50 ЛЕТ
САО РАН



Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
“Наука”
Москва

Земля и Вселенная

5/2016



Новости науки и другая информация:

Столкновение четырех галактик (5);
Эмиссионная туманность в Малом Магеллановом Облаке (25);
«Юнона» вышла на орбиту Юпитера (40); Солнце в апреле – мае 2016 г. (81); Активное ядро галактики (102); Зародыши сверхмассивных черных дыр (107)

В номере:

- 3 БАЛЕГА Ю.Ю. К 50-летию Специальной астрофизической обсерватории РАН
6 ВЕРХОДАНОВ О.В., ПАРИЙСКИЙ Ю.Н. РАТАН-600 и радиогалактики
26 ТРУШКИН С.А. Радиоизлучение микроквазаров
41 МИНГАЛИЕВ М.Г., СОТНИКОВА Ю.В. Исследование активных ядер галактик
57 БОГОД В.М. Исследования атмосферы Солнца
71 КЛОЧКОВА В.Г. Телескоп БТА в поиске звездного нуклеосинтеза

ЛЮДИ НАУКИ

- 84 СЕМЁНОВА Т.А., ТЕМИРОВА А.В. Юрий Николаевич Парийский
90 ГИНДИЛИС Л.М. Иосиф Самуилович Шкловский (к 100-летию со дня рождения)

СИМПОЗИУМЫ, КОНФЕРЕНЦИИ, СЪЕЗДЫ

- 103 СОКОЛОВ В.В. Форум в России по нейтринным сигналам

ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ АСТРОНОМИЯ

- 108 ЩИВЬЁВ В.И. Небесный календарь: ноябрь – декабрь 2016 г.



© Российская академия наук, 2016
© ФГУП «Издательство «Наука», 2016
© Редколлегия журнала
«Земля и Вселенная». Составление, 2016

Zemlya i Vselennaya (Earth and Universe); Moscow, Profsoyuznaya str., 90, f. 1965, 6 a year; by the Nauka (Science) Publishing House; Joint edition of the Russian Academy of Science; popular, current hypotheses of the origin and development of the Earth and Universe; astronomy, geophysics and space research; Chief Editor V.K. Abalakin; Deputy Editor V.M. Kotlyakov; Deputy Editor S.P. Perov

На стр. 1 обложки: Слияние двух галактик в скоплении SpARCS1049 + 56, находящемся на расстоянии 9,8 млрд св. лет от нас в созвездии Большой Медведицы. В центре – галактика-монстр “поедает” другую. Изображение в инфракрасном спектре получено в 2015 г., составлено из снимков KTX (синий и зеленый цвет) и космической обсерваторией “Спитцер” (красный цвет). Фото NASA/STScI/ESA/JPL (к стр. 102).

На стр. 2 обложки: Сливающиеся скопления галактик MACS J0717.5+3745 и MACS J0416.1–2403 (5,43 и 4,3 млрд св. лет от нас, созвездия Возничего и Эридана соответственно). Изображения получены в 2015 г. KTX (красный и зеленый цвет), космической обсерваторией “Чандра” (синий и фиолетовый) и радиотелескопом VLA (розовый). Фото NASA/STScI/NRAO (к стр. 5).

На стр. 3 обложки: Сверхмассивная черная дыра OJ29323 находится в созвездии Большой Медведицы в 212 тыс. св. лет от нас. Синее газовое облако окружает оранжево-красный диск из материала, падающего на зародыш растущей черной дыры. Рисунок художника. Во врезках: изображения получены 15 октября 1999 г. KTX в оптике (внизу) и 22 июля 2010 г. – космической обсерваторией “Чандра”, в рентгеновском диапазоне (экспозиция – 46 ч 07 мин). Фото NASA/ESA (к стр. 107).

На стр. 4 обложки: Эмиссионная туманность LHA 120-N55, находящаяся в сверхпузыре из раскаленного газа LMC4 в Большом Магеллановом Облаке (расстояние – 163 тыс. св. лет). Снимок получен в апреле 2016 г. 8,2-м телескопом VLT. Фото ESO (к стр. 25).

In this issue:

- 3 BALEGA Yu.Yu. To the 50th Anniversary of Special Astrophysical Observatory of RAS
- 6 VERKHODANOV O.V., PARIYSKY Yu.N. RATAN-600 and Radiogalaxies
- 26 TRUSHKIN S.A. Radio Emission from Microquasars
- 41 MINGALIEV M.G., SOTNIKOVA Yu.V. Studying Active Galactic Nuclei
- 57 BOGOD V.M. Studies of Solar Atmosphere
- 71 KLOCHKOVA V.G. BTA Telescope in Search for Stellar Nucleosynthesis

PEOPLE OF SCIENCE

- 84 SEMENOVA T.A., TEMIROVA A. V. Yuriy Nikolaevich Pariysky
- 90 GINDILIS L.M. Iosif Samuilovich Shklovsky (to the 100th Anniversary of Birth)

SYMPOSIA, CONFERENCES, CONGRESSES

- 103 SOKOLOV V.V. Forum in Russia on Neutrino Signals

AMATEUR ASTRONOMY

- 108 SHCHIV'YOV V.I. Celestial Calendar: November-December 2016

Редакционная коллегия:

главный редактор член-корреспондент РАН В.К. АБАЛАКИН,
зам. главного редактора академик В.М. КОТЛЯКОВ,
зам. главного редактора доктор физ.-мат. наук С.П. ПЕРОВ,
доктор физ.-мат. наук А.А. ГУРШТЕЙН,
академик Л.М. ЗЕЛЁНЫЙ,
доктор исторических наук К.В. ИВАНОВ,
кандидат физ.-мат. наук О.Ю. ЛАВРОВА,
член-корр. РАН А.А. МАЛОВИЧКО, доктор физ.-мат. наук И.Г. МИТРОФАНОВ,
член-корр. РАН И.И. МОХОВ, член-корр. РАН А.В. НИКОЛАЕВ,
член-корр. РАН И.Д. НОВИКОВ, доктор физ.-мат. наук М.В. РОДКИН,
доктор физ.-мат. наук Ю.А. РЯБОВ, член-корр. РАН В.А. СОЛОВЬЁВ,
кандидат физ.-мат. наук О.С. УГОЛЬНИКОВ, член-корр. РАН В.П. САВИНЫХ,
академик А.М. ЧЕРЕПАЩУК, доктор физ.-мат. наук В.В. ШЕВЧЕНКО



К 50-летию Специальной астрофизической обсерватории РАН

В июле 2016 г. Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) исполнилось 50 лет. Крупнейшее научное учреждение, занимающееся наземными исследованиями Вселенной в радио- и видимом диапазонах спектра создавалось предыдущим поколением астрономов, инженеров и конструкторов Советского Союза для того, чтобы вывести отечественную астрономическую науку на передовые мировые рубежи. Расходы на изготовление самых больших в мире на тот период телескопов в сегодняшних ценах составили более 150 млн долларов, что является абсолютным рекордом для нашей астрономии. Создание САО РАН стало одним из крупнейших в мире реализованных научных проектов середины 1960-х гг. У истоков обсерватории стояли выдающиеся ученые и организаторы науки – Прези-



дент АН СССР академик М.В. Келдыш, вице-президент АН СССР академик Б.П. Константинов, академик-секретарь Отделения общей физики и астрономии АН СССР академик Л.А. Арцимович, а также известные руководители страны – Председатель Совмина СССР А.Н. Косыгин и секретарь ЦК КПСС куратор оборонной промышленности Д.Ф. Устинов.

Обсерватория изначально создавалась как центр коллективного пользования для всего советского астрономиче-

ского сообщества, а телескопы БТА и РАТАН-600 (как и другие крупнейшие телескопы мира) получили статус общих инструментов для использования. Спектр решаемых задач охватывал весь диапазон астрономических объектов – от галактик на космологических расстояниях и реликтового фона Вселенной до ближайших тел Солнечной системы. Оглядываясь на полвека назад отметим, что в ту эпоху астрономы СССР отнюдь не были едины во мнении о необходимости создания гигантских инструментов на Северном Кавказе. Многие высказывали идеи, что лучше дооснастить оборудованием имевшиеся в то время небольшие обсерватории. Критическая точка зрения о работе Обсерватории сохраняется и поныне, хотя всеми признается очевидный факт – она единственная в стране, куда каждый астроном может подать заявку



Академики Л. А. Арцимович и М.В. Келдыш в CAO АН СССР. Станица Зеленчукская, 17 июля 1969 г.

в техническом отношении и сами телескопы. Основным достоянием Обсерватории является отнюдь не астрономическая техника, а уникальный коллектив ученых, инженеров и рабочих высшей квалификации, одинаково хорошо владеющих современными методами наблюдений и знаниями актуальных задач астрофизических исследований. Именно благодаря этому CAO РАН удалось практически без потерь пережить период тяжелых кризисов 1990-х гг. и продолжить модернизацию инструментов и развитие научных исследований.

Для жизни нашего учреждения всегда особое значение имело сотрудничество с отечественными и зарубежными институтами своего профиля. В наши дни – это Государственный астрономический институт МГУ, Астрокосмический центр ФИАН, Институт астрономии РАН, Институт космических исследований РАН, Главная астрономическая обсерватория РАН, Нижегородский институт прикладной физики РАН. Особое место в жизни Обсерватории занимали связи с Крымской астрофизической обсер-

в программный комитет и получить требуемый наблюдательный материал по самым актуальным задачам астрофизики. В общей сложности на телескопе БТА за период с момента ввода в эксплуатацию в 1975 г. выполнено примерно 3 тысячи, а на радиотелескопе РАТАН-600 – около 850 наблюдательных программ.

Научный коллектив Обсерватории формировался «с нуля». В отличие от большинства других возникших в тот период учреждений науки, которые создавались под уже известного лидера (или группу лидеров), основу ее коллектива составили молодые ученые, пришедшие из разных регионов страны и не имевшие за спиной большого научного багажа. Первый директор обсерватории доктор физико-матема-

тических наук И.М. Копылов предоставлял широкую свободу в выборе направлений исследований, которые впоследствии стали тем, что сейчас называют научной школой CAO РАН. Время было настолько динамичным, что даже название обсерватории – Специальная, придуманное кем-то как рабочий вариант на период строительства, закрепилось навсегда, каким бы нелепым оно сегодня не казалось.

За прошедшие годы коллективом Обсерватории выполнена огромная работа по оснащению телескопов новейшими инструментами для астрофизических исследований – от спектрографов, фотометров и интерферометров до высокочувствительных приемников радио- и видимого диапазонов. Полностью преобразились

ваторией и Бюраканской астрофизической обсерваторией в Армении. Сотрудничество с ними в период становления САО АН СССР существенно повлияло на ее структуру и научную тематику. Пути развития нашей инструментальной базы в значительной мере были определены взаимодействием с промышленными предприятиями и ведомственными институтами страны: Ленинградскими оптико-меха-

ническим объединением (ЛОМО), ВНИИ Телевидения и НПО “Электрон”, Киевским НПО “Сатурн”, Сызранским заводом тяжелого машиностроения, НПО “Сибкриотехника” и другими. Важнейшую роль в развитии технологий наблюдений на телескопах сыграла тесная кооперация с Марсельской обсерваторией и Боннским институтом радиоастрономии.

Когда речь идет о 50-ти годах истории, –

трудно выделить важнейшие результаты, полученные на телескопах нашей Обсерватории. О некоторых из них, признанных во всем мире, вы прочтете в настоящем номере журнала. Надеюсь, что этот материал будет полезен тем, кто интересуется историей и нынешним состоянием отечественной астрономии.

*Ю.Ю. БАЛЕГА,
член-корреспондент РАН
научный руководитель
САО РАН*

Информация

Столкновение четырех галактик

Катаклизм во Вселенной, масштаб которого трудно представить, происходил 5,43 и 4,3 млрд лет назад, когда столкнулись галактики и образовали скопления галактик MACS J0717.5+3745 и MACS J0416.1-2403, находящихся в созвездиях Возничего и Эридаана соответственно (см. стр. 2 обложки; Земля и Вселенная, 2015, № 5, с. 88; 2016, № 2, с. 109). Это гигантские образования, например масса MACS J0416.1-2403

превышает массу всей нашей Галактики в 420 раз! MACS J0717.5 + 3745 – один из самых сложных объектов такого типа, поскольку в нем сталкиваются сразу четыре галактики! Ученые выделили 57 типов столкновений галактик (Земля и Вселенная, 2014, № 3, с. 90–91).

Для того, чтобы узнать больше о скоплениях (в том числе, о том, как зависит их рост от столкновений между ними) астрофизики по программе “Границы поля” («Frontier Fields») исследовали несколько скоплений в различных диапазонах спектра, используя наиболее мощные телескопы – космическую рентгеновскую обсерваторию “Чандра”, KTX и наземный радиотелескоп VLA (NRAO). Данные радиотелескопа позволили об-

наружить в них огромные ударные волны и области турбулентности.

Ученые долгое время не могли определить, наблюдают ли они MACS J0416.1-2403 после столкновения, или же оно еще только должно произойти. Оказалось, что на снимке запечатлен момент до слияния галактик, поскольку в противном случае темная материя и горячий газ должны были бы отделиться друг от друга. Отсутствие четких структур в радиодиапазоне свидетельствует о соприкосновении галактик, но не о их слиянии. Предполагается, что в нем содержится много темной материи, перемешанной с раскаленным газом.

Пресс-релиз NASA,
10 марта 2016 г.



РАТАН-600 и радиогалактики

О.В. ВЕРХОДАНОВ,
доктор физико-математических наук
Ю.Н. ПАРИЙСКИЙ,
академик САО РАН

В 1974 г. учеными Специальной астрофизической обсерватории были выполнены первые наблюдения участков неба с помощью 600-м радиоастрономического телескопа РАТАН-600 Академии наук СССР (Земля и Вселенная, 1976, № 4, 1977, № 6; 1981, № 3). Это произошло еще до официального завершения работ по строительству РАТАН-600 в 1977 г. Одна из основных задач этого инструмента, сформулированных



на момент подготовки проекта радиотелескопа, – проведение глубоких обзоров неба на не-



скольких длинах волн и, в частности, поиска и исследования радиогалактик.

К ИСТОРИИ ОБЗОРОВ НЕБА НА РАТАН-600

Глубокие обзоры неба проводятся с хорошим разрешением и чувствительностью, чтобы шум слабых радиоисточников не мешал поиску и выделению небесных объектов. Такие обзоры часто имеют не-

сколько целей: поиск и исследование радиоисточников, а также изучение фоновое радиоизлучения неба, которое может быть связано с излучением Солнечной системы и нашей Галактики и космологическим фоном. Среди наиболее важных программ наблюдений на радио-

телескопе РАТАН-600 – эксперимент “Холод”, проведенный в 1980-х гг. с целью исследования предельных возможностей РАТАН-600 при минимальных шумах системы радиотелескоп – радиометр. В эксперименте был использован радиометр с параметрическим уси-

лителем, лучший в Советском Союзе в начале 1980-х гг. по флуктуационной чувствительности для поиска слабых объектов. За несколько месяцев наблюдений в 1980 г. был достигнут уровень чувствительности ниже 1 мЯн плотности потока, который определяется слабыми фоновыми радиоисточниками, видимыми на длине волны 7,6 см. При наблюдениях по программе “Холод” использовался Северный сектор радиотелескопа. Наблюдения проводились в меридиане на склонении $+4^{\circ}54'$ с шириной полосы $10'$. Склонение было выбрано по координатам объекта SS 433 – самого известного микровозара в нашей Галактике (Земля и Вселенная, 1980, № 4). В эксперименте использовались дополнительные длины волн, данные по которым позволили решать разнообразные астрофизические задачи:

- радиометр на длине волны 8,2 см помогал отождествлять (обнаруживать и опознавать) локальные помехи;

- наблюдения на волнах 2,08 и 3,9 см использовались для определения флуктуаций излучения атмосферы;

- волна в 31 см применялась для распознавания локальных (в частности, автомобильных) помех, а также для выделения излучения Галактики.

Одним из основных результатов программы обзоров “Холод” стал каталог радиоисточников, который лег в основу программы исследования далеких радиогалактик “Большое Трио”, названной так по числу трех основных телескопов – РАТАН-600, VLA Национальной радиоастрономической обсерватории (NRAO, США) и БТА САО РАН, которые в нем “участвовали”.

К моменту получения первых данных в сантиметровом диапазоне длин волн в результате глубокого обзора неба в эксперименте “Холод” для исследования анизотропии космического трехградусного фонового радиоизлучения не существовало каталогов неба со слабыми объектами в изучаемой на РАТАН-600 области. Самый достоверный каталог 3CR (Кембриджский каталог 1959 г.) на частоте 178 МГц имел “порог” чувствительности около 10 Ян; основная популяция радиоисточников со стандартными спектрами обрывалась на уровне плотности потока около 0,5 Ян на волне 7,6 см. Это – на два порядка выше флуктуационной чувствительности даже одного суточного обзора неба. Только объекты с очень “крутыми спектрами” (поток радиоизлучения на длинных волнах в разы больше потока на коротких, как у пуль-

саров) могли случайно совпасть с источниками каталогов обзоров в метровом диапазоне длин волн и обзоров на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне. Учитывая относительно низкую координатную точность данных, полученных на РАТАН-600 (10–30 секунд дуги), проводить глубокое оптическое отождествление (поиск для радиоисточника кандидата на родительскую галактику на оптическом снимке) слишком сложно. Положение кардинально изменилось в 1984 г. после обнаружения до публикации американским радиоастрономом Дж. Дугласом самого глубокого каталога тех лет. В этот каталог занесены данные по объектам на волне 82 см с координатной точностью $1-3''$ и с пороговой чувствительностью в 20 раз выше, чем в каталоге 3CR. Этого было недостаточно для распознавания всех объектов с помощью РАТАН-600, но зато практически все радиоисточники с “крутыми спектрами” оказались общими для двух этих каталогов. Источники с плоскими спектрами, обнаруженные с помощью РАТАН-600, были недоступны для каталога Дугласа. Дальнейшее исследование объектов по RC-каталогу, составленному в 1980 г. на основе обзора неба с помощью РАТАН-600, было связа-



но с поиском кандидатов в самые удаленные объекты во Вселенной с помощью данных об их радиоспектрах.

RC-каталог содержит 1140 радиоисточников в узкой полосе неба шириной около 40' вокруг склонения SS433. Около 10% объектов имели достаточно крутые двухчастотные спектры, которые стали основой международной программы "Большое Трио" с участием радиоинтерферометра VLA (NRAO, США) и 6-м оптического теле-

скопа САО РАН. При относительно небольшой области обзора (200 квадратных градусов) и значительно большей глубине эта выборка оказалась более, чем в сотни раз, "плотной" по числу объектов с очень "крутыми спектрами" на квадратный градус, а также первой, использующей сантиметровый диапазон при селекции таких спектров.

Перед тем, как перейти к описанию программы "Большое Трио", кратко рассмотрим важные свойства радиогалактик.

Северный сектор и плоский отражатель радиотелескопа РАТАН-600 (а). На заднем фоне видна гора Джисса за станцией Зеленчукская, Карачаево-Черкесия. Рупоры радиометров (б), расположенные в фокальной плоскости радиотелескопа на подвижной части приемной кабины № 1, включающие матричную радиометрическую систему "МАРС-2" ($\lambda = 1$ см), приемники ($\lambda = 6,25, 3,9, 2,7$ и $1,4$ см), а также первичный облучатель с совмещенными фазовыми центрами ($\lambda = 13, 31$ и 49 см). Фото Лаборатории радиометров континуума САО РАН.

Среди небесных объектов радиогалактики выделяются особо (Земля и Вселенная, 1978, № 1; 1980, №№ 2 и 5) не только своей светимостью и размером, но и уникальной ролью в эволюции вещества во Вселенной. Их физические свойства астрономы используют при определении динамических и физических параметров Вселенной.

Что представляет собой радиогалактика? В радиодиапазоне излучают все галактики, но причины и мощность этого излучения различны. Исторически радиогалактиками называли объекты предельно высокой радиосветимости, достигающей 10^{14} светимости Солнца (до 10^{48} эрг/с). В видимом свете такие объекты, как правило, отождествлялись с галактиками. Если же радиоисточник выглядел точечным объектом, то его классифицировали как квазар. Позднее, после проведения более чувствительных обзоров неба на различных радиотелескопах и массовом оптическом отождествлении радиоисточников, появилась необходимость уточнить смысл термина «радиогалактика».

Так, радиоизлучение обычной галактики может быть связано с процессами, происходящими в ее ядре, — с вылетающими струями плазмы из

центрального объекта, с остатками сверхновых или с облаками нейтрального водорода и других молекул. Но, с другой стороны, разные классы объектов имеют схожие причины возникновения радиоизлучения и вообще оказываются связанными между собой эволюционно и/или представляют собой различные виды проекции на небе близких по свойствам источников. Когда Космический телескоп Хаббла обнаружил звездное «окружение» у всех квазаров, то строгое разделение на радиогалактику или квазар стало «размытым».

Итак, будем называть радиогалактиками такие галактики, у которых, во-первых, радиосветимость сравнима с оптической (причем последняя определяется суммарной светимостью звезд) и, во-вторых, радиоизлучение которых связано с активностью ядра галактики. Такие объекты, как правило — самые мощные (кроме вспышечных) источники излучения из известных, за исключением самой Вселенной. Этот факт позволяет проводить их изучение на больших красных смещениях: $6 > z > 1$, то есть когда возраст Вселенной был от 1 до 6 млрд лет.

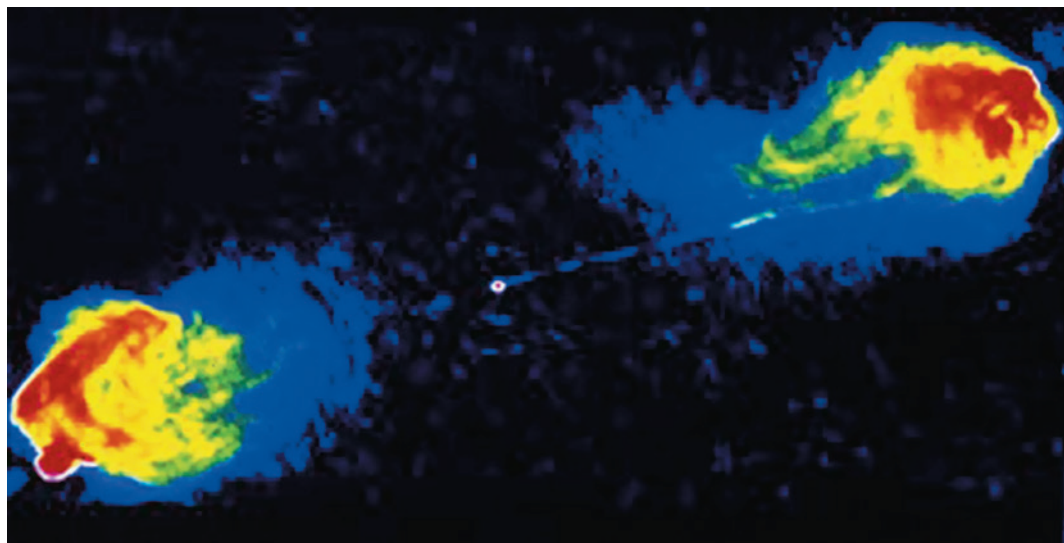
ФЕНОМЕНОЛОГИЯ

Первые обнаруженные радиогалактики. Стандартное представление о радиогалактиках как о

протяженных радиоисточниках сформировалось еще в начале 1950-х гг.; оно помогает и сегодня при описании объектов данного класса. Именно на первых исследованных радиогалактиках в то время присваивались очень простым способом: к названию созвездия добавлялось символическое обозначение А, В, С, указывающее на уменьшение радиояркости объекта в данном созвездии. Четыре из первых открытых радиогалактик — Лебедь А, Центавр А, Дева А и Печь А (Земля и Вселенная, 1983, № 1).

Лебедь А — самый мощный из известных в то время внегалактический дискретный источник радиоизлучения, отождествленный в 1951 г. с эллиптической галактикой 16^m , входящей в состав богатого скопления. Галактика вращается вокруг оси, лежащей в картинной плоскости и направленной вдоль прямой, соединяющей два ярких компактных компонента радиоизлучения. Угловое расстояние между яркими областями компонент двойной структуры — около $2' (120 \text{ кпк})$; компоненты «выстреливаемых» струй вылетают из ядра со скоростью 0,02 скорости света; в ядре галактики обнаружен компактный радиоисточник.

Центавр А (NGC 5128) — радиоисточник в созвездии Центавра, ближайшая к нам радиогалактика



(расстояние до нее – примерно 4 Мпк). Она имеет сфероидальную форму, разделенную газово-пылевым диском (поглощающим свет звезд), она наблюдается практически “с ребра”. Центавр А содержит протяженный радиоисточник, который представляет собой старую, сильно расширившуюся структуру общей протяженностью около 500 кпк.

Дева А (М87, NGC 4486) – радиоисточник сравнительно небольшой радиосветимости (10^{42} эрг/с), принадлежащий массивной эллиптической галактике типа cD в центре скопления галактик в созвездии Девы на расстоянии около 18 Мпк. У центра галактики наблюдается односторонний выброс вещества – джет длиной около 20” (порядка 1,5 кпк). Он разбивается на отдельные сгустки (узлы) и из-

лучает не только в радио-, но и в оптическом диапазоне.

Радиоисточник Печь А (NGC 1316) находится на периферии скопления галактик и состоит из двух больших компонент, имеющих сложную структуру размером примерно 200 кпк каждая, которые подпитываются струями плазмы из центра галактики. Причина выделения энергии в центре NGC 1316 – слияние (мерджинг), а, точнее, – поглощение (малый мерджинг) небольших соседних галактик. Спиральная галактика на севере может быть следующей жертвой такого галактического «каннибализма».

КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОГАЛАКТИК

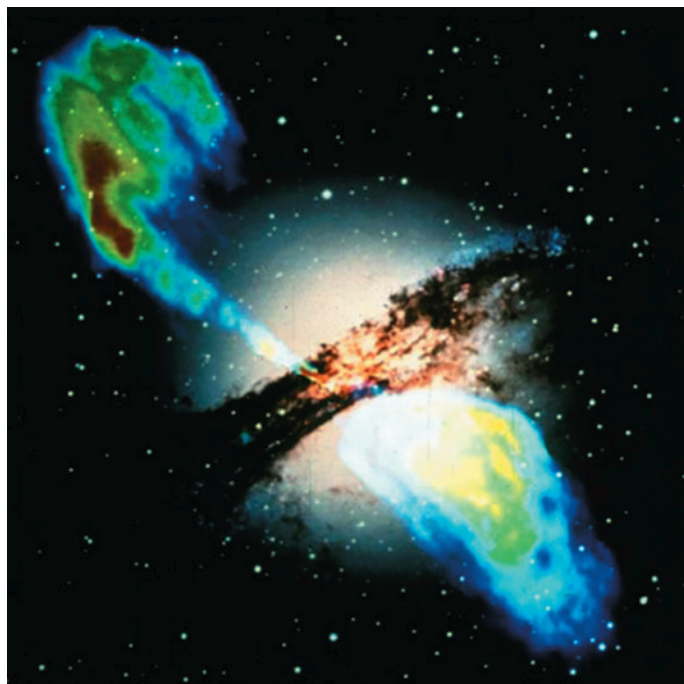
Можно выделить два подхода в радиоастрономической классификации внегалактических радио-

Радиогалактика Лебедь А. Из центрального источника – квазара, находящегося внутри эллиптической галактики, “выстреливаются” две струи плазмы (джеты). При столкновении со средой джеты формируют протяженные компоненты с горячими пятнами. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

источников: первый – по виду непрерывного радиоспектра (зависимость выделяемой энергии от частоты) и второй – по структуре радиоизображения (случай морфологической классификации). Оба типа классификации важны при поиске самых далеких радиогалактик.

Радиоспектры. Радиоспектр источника связан с механизмом радиоизлучения и, соответственно, с природой самого

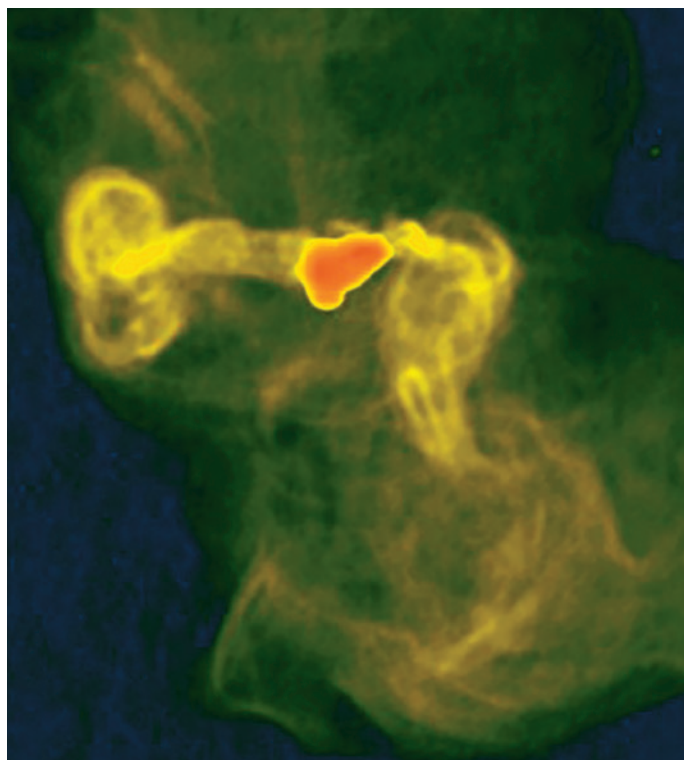
Радиогалактика Центавр А (NGC 5128). На оптическое изображение галактики наложено радиоизображение с помощью радиоизофот — линий одинаковой радиояркости. Центр галактики, где находится квазар со сверхмассивной черной дырой, обрамляет пылевой тор, видимый в инфракрасном свете. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

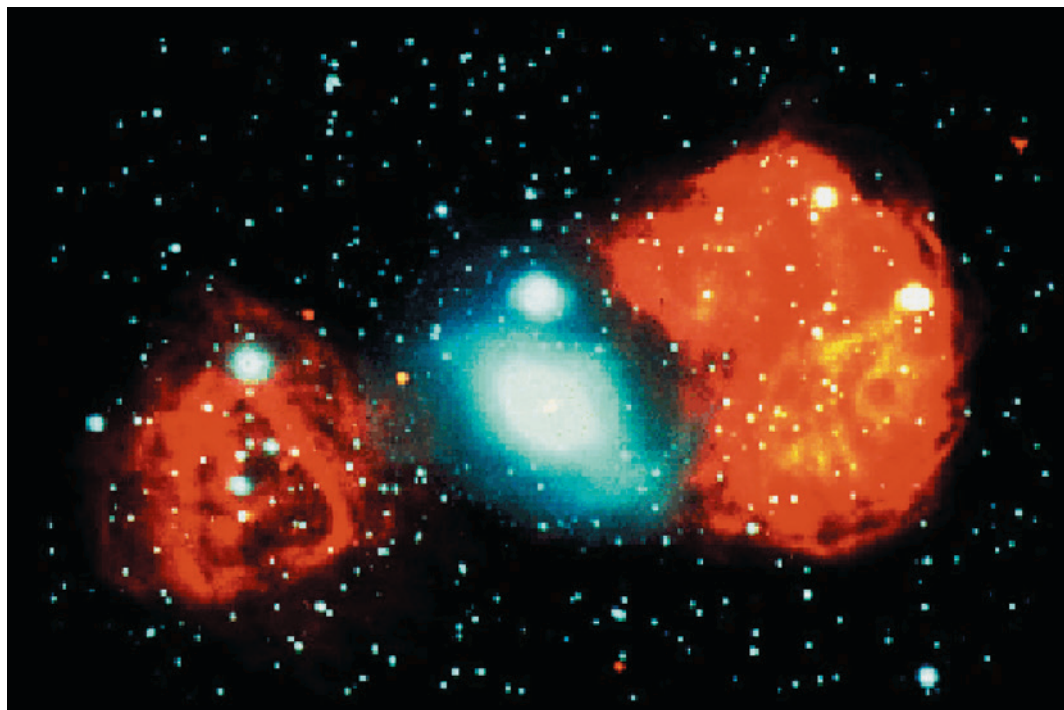


объекта. Остановимся на внегалактических радиоисточниках. Их непрерывный спектр формируется нетепловым (синхротронным) излучением. Оно возникает, когда электрон движется с околосветовой скоростью в магнитном поле по спиральной траектории, “наматывающейся” на силовую линию поля. В этом случае плотность потока излучения падает с ростом частоты.

Морфологическая классификация радиогалактик. При изучении формы источника в радиодиапазоне (то есть при распре-

Радиогалактика Дева А (M87, NGC 4486) в центре скопления галактик. Гигантская эллиптическая галактика типа cD — гигантский радиоисточник, формирующий структуру — радиококон. Из центрального квазара вылетают две струи плазмы (джеты). Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.





делении яркости галактик в радиодиапазоне) выделяют их различные морфологические особенности:

- ядро – компактная структура размером менее $0,1''$, не делимая на детали; совпадает с ядром в оптике, имеет плоский или сложный радиоспектр;

- протяженные структуры – большие по длине области радиоизлучения;

- джеты (струи) – тонкие и конусообразные структуры, связывающие ядро с внешними областями;

- горячие пятна – максимумы интенсивности, расположенные во внешних пределах протяженных структур радиоисточников;

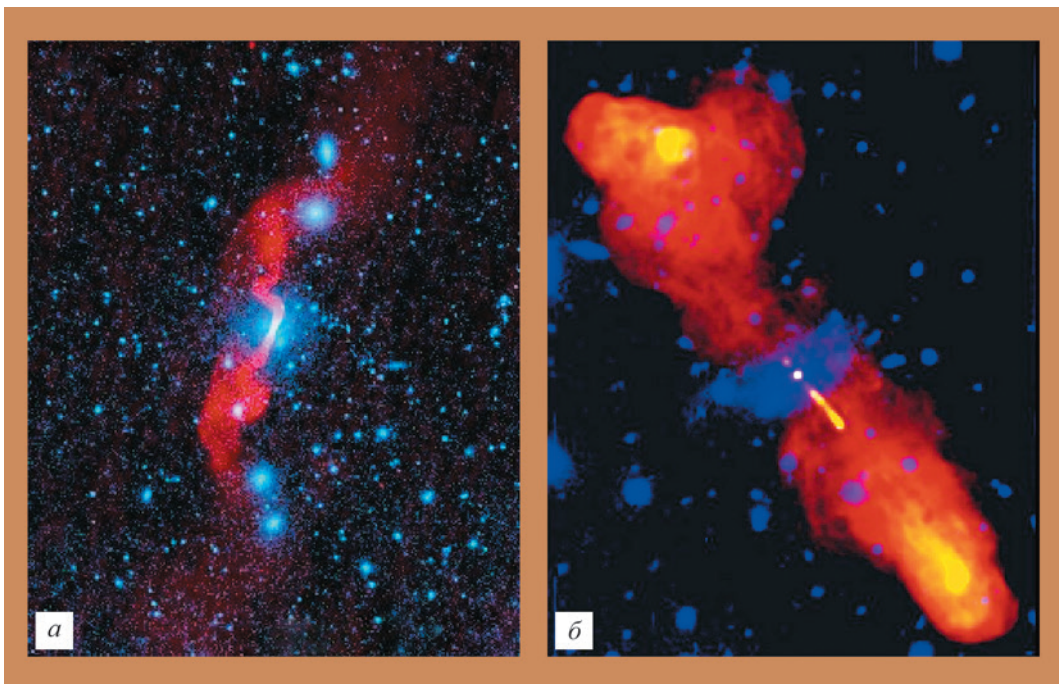
- узлы – области усиления яркости свечения в джетах;

- гало – протяженная область радиоизлучения (радиококон), окружающая радиогалактику (например, как у радиогалактики Дева А).

Используя особенности структуры и распределения радиояркости для объектов каталога 3CR, в 1974 г. астрофизики Б. Фонарёв и Дж. Райли ввели классификацию протяженных радиоисточников, разбив их на два класса. Первый тип радиогалактик (FR I) имеет спадающее к краям источника распределение радиояркости, второй (FR II) – концентрирующееся преимущественно в боковых

Радиогалактика Печь А (NGC 1316). В центре – оптическое изображение гигантской эллиптической галактики, расположенной в середине скопления галактик в созвездии Печь, рядом с которой находятся два протяженных радиокомпонента, связанных с активностью центральной черной дыры. Вокруг центрального объекта другим оттенком отмечено рентгеновское гало. Над NGC 1316 расположена карликовая галактика, которая будет “съедена” через 100 млн лет. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

компонентах, с горячими пятнами. Граница светимости между обоими классами не всегда строгая и существуют “перекрытия” в светимости объектов, отобранных



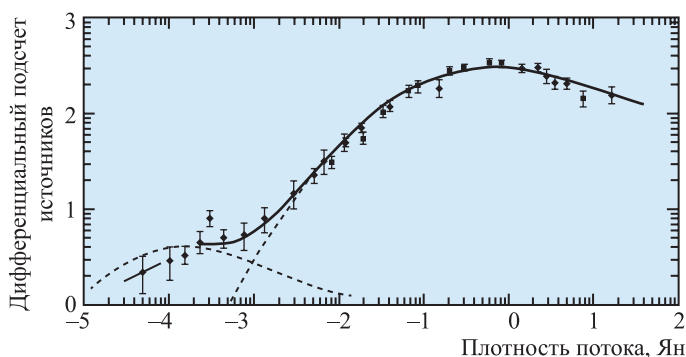
Радиогалактики: а – 3C31 (класс FR I) в созвездии Рыбы, б – 3C219 (класс FR II) в созвездии Большой Медведицы. Радиоизображения наложены на оптические. NRAO, США.

График зависимости числа радиоисточников от их плотности потока ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт/м}^2 \text{ Гц}$), обнаруженных на частоте 1,4 ГГц. Штриховыми линиями показан “вклад” спиральных и эллиптических галактик. Избыток числа источников объясняется эволюцией и более высоким темпом их образования в ранние эпохи. По данным американского радиоастронома Дж. Кондо-на, 1984 г.

как FR I и FR II на основании их структуры.

Источники типа FR I часто (но не всегда) отождествляются с яркими большими галактиками (классы E, D или cD) – с более плоскими профилями в радиальном распределении яркости, чем средняя эллиптическая галактика. Эти объекты часто располагают-

ся в богатых скоплениях с горячим газом. Источники типа FR II, в основном, принадлежат к гигантским эллиптическим галактикам – как правило, более мощным, чем FR I. Одна из популярных эволюционных моделей основана на оптических данных, она исследует родительские галактики и их окруже-



ние. Оба класса источников могут быть связаны – принадлежать к одной эволюционной последовательности. По этой гипотезе радиоисточники типа FR II – более молодые и с особенно мощным выделением энергии; когда подпитывающий ядро газ заканчивается, источник за сотни миллионов лет угасает и переходит в тип FR I.

КОСМОЛОГИЯ

Чем же полезны радиогалактики для космологии? В поисках ответа на вопрос о том, как устроена Вселенная (каковы ее физические параметры, динамика расширения, геометрия и форма) наблюдательная космология использует астрономические тесты и физику элементарных частиц. Стандартные космологические тесты – наблюдения с целью определения параметров Вселенной, применяемые в области радиоастрономии, можно условно разбить на три группы по типу изучаемых объектов: реликтовое излучение, радиогалактики и пульсары.

К первой группе тестов относятся:

- построение спектра мощности реликтового излучения, по которому определяются основные космологические параметры: все типы плотности, постоянная расширения Хаббла и другие;

- статистика реликтового сигнала и определение топологии Вселенной;

- уровень сглаживания фонового излучения при гравитационном линзировании скоплений галактик (тест на плотность барионной и темной материи и на постоянную Хаббла);

- корреляционные спектры поляризации (тест на время образования первых звезд и “зажигания” первых активных ядер галактик (Е-мода поляризации); на уровень первичных гравитационных волн (В-мода поляризации).

Тесты второй группы (для радиогалактик):

- зависимость « $\log N - \log S$ » (число источников – плотность потока) – тест на плотность активных галактических ядер, эволюцию радиоисточников и евклидову космологическую модель;

- зависимость “размер – красное смещение” (тест “стандартная линейка”);

- зависимость “плотность потока – красное смещение” (тест “стандартная свеча”);

- возраст звездных систем (тест “стандартные часы”) для исследования параметров плотности и динамики Вселенной;

- гравитационное линзирование (тест на плотность видимой и темной материи, темной энергии) также применяется при поиске и исследова-

нии очень далеких объектов;

- поиск далеких скоплений и протоскоплений галактик, отражающих формирование крупномасштабной структуры (измерение параметров плотности разных типов энергетических компонентов Вселенной);

- скорости вращения галактик и поиск темной материи по наблюдениям водорода;

- поиск сверхмассивных черных дыр (исследование проблемы их возникновения и роста в рамках проверяемых космологических моделей);

- исследование радиогалло скоплений и галактик для поиска частиц – кандидатов в темную материю.

Тесты третьей группы (для пульсаров):

- двойные пульсары (исследование излучения гравитационных волн);

- пространственная сетка пульсаров (регистрация и изучение гравитационных волн).

Кроме того, есть различные комбинированные тесты: например, одновременно для реликтового излучения и радиогалактик; их результатом может стать определение согласованной со всеми экспериментами космологической модели.

Перед тем, как перейти к рассмотрению основных космологических тестов для радиогалактик, отметим несколько важ-

ных фактов об их физических и эволюционных свойствах. Активность радиогалактик связана с активностью их ядер (или “центральных машин”). Среди применяемых гипотез простейший вариант “центральной машины” — квазар, содержащий сверхмассивную черную дыру массой 10^9 – $10^{10} M_{\odot}$ и аккреционный диск из обращающегося и падающего на нее разогретого газа. Из ядра галактики истекают коллимированные струи (джеты) ионизованного вещества со скоростью до $1/3$ от световой и перпендикулярные плоскости аккреционного диска. Джеты сталкиваются с окружающей средой, образуя протяженные радиоизлучающие компоненты, в которых наблюдаются горячие пятна с “крутым” радиоспектром. Вследствие этого формируется радиисточник типа FR II (гантелевидной формы и с высокой светимостью). Если вещество в аккреционном диске иссякает, то “затухает” и активность радиисточника; тогда образуется радиогалактика типа FR I (с выделяющимся центром и двумя симметрично расположенными широкими радиокомпонентами). Квазар в эллиптической галактике может быть экранирован от наблюдателя пылевым тором; тогда звезды галактики не “засвечиваются”

ядром. Отсюда следует: для того, чтобы радиисточник “загорелся”, необходимо наличие и газа, и сверхмассивной черной дыры. Источником газа в “спокойной” эллиптической галактике может стать другая галактика, ранее “съеденная” (или испытывавшая слияние — мерджинг) родительской галактикой. Процесс мерджинга галактик чаще происходит там, где их плотность повышена, а именно — в скоплениях галактик. Самые массивные галактики скоплений — гигантские эллиптические галактики (gE) — чаще других испытывали слияния и чаще других являются мощными радиисточниками, особенно в ранние эпохи. В стандартных схемах эволюции галактик мерджинг обеспечивает как быстрый рост самой галактики, так и рост ее центральной черной дыры. Отметим, что именно существование радиогалактик высокой светимости привело к необходимости привлечения гипотезы о существовании сверхмассивных черных дыр. Гигантские эллиптические галактики вырастают и набирают массу до $10^{12} M_{\odot}$ довольно быстро — за первый миллиард лет существования Вселенной. С учетом того, что мощность радиоизлучения связана с массой центральной черной дыры галактики, выполнены оценки

потока излучения от таких объектов. Эти оценки показали, что в эпоху “зажигания” первых радиисточников они настолько мощные, что их можно увидеть с Земли на современных радиотелескопах на уровне 1 – 10 мЯн.

Итак, внутри горизонта нашей видимой Вселенной мы можем зарегистрировать сигнал практически от всех образовавшихся радиогалактик. Столь огромная мощность излучения позволяет исследовать их на любых расстояниях в Метагалактике и использовать как “пробные частицы” для изучения физических условий и динамики Вселенной в разные космологические эпохи. Еще одним важным моментом является то, что радиогалактики — это, в основном, галактики типа gE, содержащие пассивно эволюционирующее звездное “население”; для них созданы удовлетворительные модели эволюции: по светимости gE на разных длинах волн можно оценить возраст звездного “населения”, а, значит, и время образования галактики.

РАДИОГАЛАКТИКИ КАК КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ РЕПЕРЫ

Для того, чтобы воспользоваться радиогалактиками как “пробными частицами” (или реперными точками), необходимо ориентироваться на

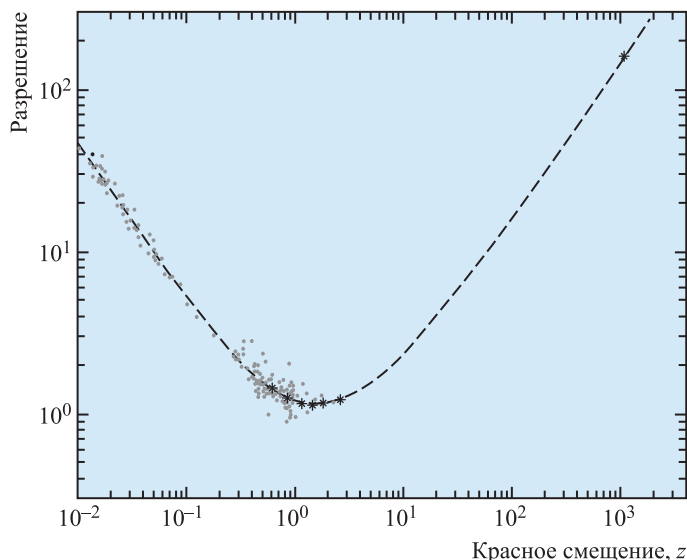


Диаграмма “угловой размер – красное смещение”. Каждая светлая звездочка – бин (шаг осреднения), содержащий 77 радиоисточников с миллисекундным размером. Темные звездочки соответствуют пятнам на карте реликтового излучения. Верхняя звезда справа соответствует размеру акустического горизонта Вселенной.

известные стандартные параметры галактик: например, на такие, как размер, светимость, масса, возраст и их соотношения, которые либо почти не изменяются в ходе эволюции, либо меняются по известному закону. Тогда, сопоставив их наблюдаемые величины в различные космологические эпохи с ожидаемыми в космологических теориях, можно сделать несколько выводов: об удаленности объектов и возрасте Вселенной на разных красных смещениях; о плотности и свойствах окружающей материи и пространства; оценить динамические параметры Вселенной. Кроме того, наблюдаемая связь между различными физическими параметрами радиогалактик: массой галактики, массой центральной черной дыры, оптической и радио-

светимостью и другими позволяет говорить о существовании так называемой фундаментальной плоскости радиогалактик. Эта связь упрощает применение некоторых космологических тестов.

Определить космологические параметры сложно – нужна достаточно большая выборка объектов на различных красных смещениях (z), передавших нам информацию из нескольких космологических эпох. Здесь особенно важен поиск объектов на больших красных смещениях ($z > 2$), где радиоисточников известно не так много. Измерение красных смещений для наиболее далеких объектов – занятие трудоемкое, так как требует большого времени накопления сигнала. Для ускорения процесса применяют различные методы отбора кандида-

тов в далекие объекты, позволяющие увеличить вероятность того, что радиогалактика находится от нас далеко. В мире работает по этому направлению несколько групп ученых: в Голландии, Великобритании, Германии, Индии, США и в России.

Остановимся на описании некоторых космологических тестов, базирующихся на физических свойствах радиогалактик.

СТАНДАРТНАЯ ЛИНЕЙКА

Зависимость размера источника от значения красного смещения является одним из наиболее часто используемых тестов для определения параметров Вселенной в области наблюдательной космологии. К примеру, если мы знаем физический размер объектов на различных красных смещениях, то их угловой размер характеризует динамику расширения Вселенной. У радиогалактик, являющихся эволюционирующими

радиоисточниками, в качестве “стандартной линейки” можно использовать две предельные величины: минимальную – размер ядра радиогалактики, определяемый размером (или массой) сверхмассивной черной дыры – и максимальный размер, определяемый скоростью и временем разлета струй из ядра галактики. Комбинируя данные различных экспериментов по угловому размеру, можно довольно точно определить космологическую модель. По такому пути пошли британские астрономы Дж. Джексон и А. Джанентта в 2006 г., объединив данные об угловых масштабах миллисекундных радиоисточников, теоретически характеризующих размер ядра, и о пятнах флуктуаций реликтового излучения (вплоть до горизонта Вселенной на $z = 1100$ для пятен размером $\sim 25''$). Это можно сделать, используя параметр расширения Хаббла – зависимость $H(z)$, представляющую собой функцию, содержащую значения плотности разных компонентов Вселенной.

Полученная диаграмма позволяет проводить совместные оценки космологических параметров, получаемых при анализе данных от принципиально “независимых” экспериментов. В результате авторы получают следующие оценки значений параметров: плотность

материи $\Omega_m = 0,302$, темная энергия $\Omega_\Lambda = 0,694$, а также параметр кривизны $K = 0,013$. Отметим интересный момент – плавную стыковку масштабов, придающую символический смысл объединению разных подходов в космологии в одной диаграмме.

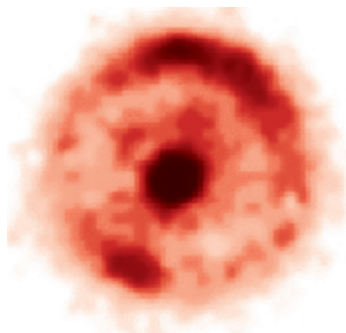
Вторая возможность использовать “стандартную линейку” – определить космологические параметры по физическому разному струй (максимальному размеру радиоисточников) – расстоянию между горячими пятнами в протяженных компонентах. Для этого нужно знать общие эволюционные свойства радиогалактики: скорость движения струй, типичные время активности и размер радиоисточника в выбранную эпоху, ряд других свойств. Тогда можно найти и применить “стандартную линейку”, изменяющуюся с космологическим временем по известному закону. В 2000 г. эту работу проделала группа астрофизиков под руководством Р. Дэйли (США), подтвердив присутствие темной энергии как одного из компонентов плотности.

Отметим, что большое разнообразие форм радиоисточников размером порядка килопарсека затрудняет точное измерение параметров. Для определения размера парсека необходимо иметь представление о механизме радиоизлу-

чения, дающем представление о действительном размере активного ядра. Тем не менее стандартные параметры, описывающие “центральную машину” – такие, как масса центральной черной дыры, скорость аккреции, угловой момент и величина магнитного поля – поддаются измерению. Это позволяет надеяться, что предлагаемые подходы для оценки космологической модели работают удовлетворительно.

СТАНДАРТНАЯ СВЕЧА

“Стандартная свеча” – один из часто применяемых тестов в космологии; именно с его помощью была открыта темная энергия, когда в качестве стандарта использовалась светимость вспышки сверхновой типа Ia. Применение теста “стандартной свечи” в изучении радиогалактик имеет проблемы, близкие для теста “стандартная линейка”. Радиоисточники эволюционируют, и довольно сложно установить, на каком этапе находится исследуемая радиогалактика. Радиосветимость объекта зависит от массы центральной черной дыры, темпа аккреции, типа мерджинга и от времени жизни радиоисточника. Зная функцию светимости радиогалактик (с учетом предела Эддингтона, определяемого равновесием между давлением



Гравитационная линза типа “эйнштейновское кольцо” – радиоисточник JVAS B1938 + 666 в созвездии Дракона. Изображение в радиодиапазоне получено обсерваторией NRAO, США.

излучения и гравитацией звезды), можно оценить число объектов с максимально возможной мощностью на заданном красном смещении. Отобрав в заданных интервалах красного смещения объекты с максимальной радиосветимостью, можно построить шкалу расстояний. Желательно иметь полную выборку радиогалактик на небе и знать функцию их светимости. В этой категории тестов радиогалактики сильно проигрывают сверхновым Ia.

Рассмотрим оптическую светимость радиогалактик. Как мы уже говорили выше, мощные радиогалактики, как правило, идентифицируются с гигантскими эллиптическими галактиками. Такие объекты имеют сравнительно однородное, пассивно эволюциониру-

ющее звездное “население”, эволюция которых легко описывается. Кроме того, если гигантские эллиптические (gE) галактики, являясь центральными галактиками скоплений, возникали приблизительно в одну космологическую эпоху, то они должны иметь схожую историю звездообразования и, таким образом, являться стандартом в послереионизационный период эволюции Вселенной. В качестве основного зонда в ранние эпохи ($z > 1$) для поиска gE-галактик как раз и используются радиогалактики. Основным здесь является тест “инфракрасная звездная величина – красное смещение” (диаграмма Хаббла для K-величины “K-z”). В применении к радиогалактикам тест “чувствителен” как к эволюции их звездного “населения”, так и к выбору космологической модели.

“СТАНДАРТНЫЕ ЧАСЫ” – ВОЗРАСТ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ

Возраст галактики также позволяет создать независимый от космологии тест, основанный лишь на скорости термоядерных реакций внутри звезд, – для оценки динамики расширения Вселенной. Если мы знаем эпоху возникновения галактик и можем измерить их возраст по составу звездного “населения”, то можем и оценить возраст Вселенной (t) на за-

данном красном смещении (z). Возраст галактик характеризует и эволюцию вещества во Вселенной в целом, и эволюцию активности ядер галактик, и связанные с ними сверхмассивные черные дыры. Так, например, обнаруженная радиогалактика TNJ0924–2201 в созвездии Гидры с $z = 5,19$ показала, что для массивной черной дыры, “отвечающей” за активность галактики (при возрасте Вселенной около 1 млрд лет), важен очень быстрый и эффективный процесс ее образования, который на тот момент необходимо было объяснить. Другая интересная проблема связана с существованием очень старого звездного “населения” на больших красных смещениях. Загадка, связанная с быстрым формированием гигантских эллиптических галактик, решается в иерархической схеме в рамках современной стандартной модели Λ CDM (с доминирующей темной энергией и холодной темной материей), когда галактики типа gE быстро “вырастают” за счет слияний сотен мелких (при $z = 10\text{--}13$). Это было продемонстрировано в модельном эксперименте построения крупномасштабной структуры Вселенной – “Миллениуме”.

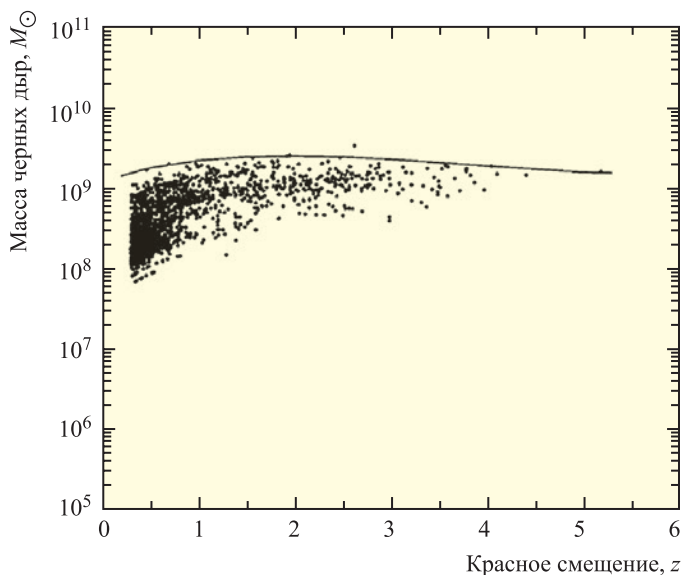
Для оценки возраста звездной системы требуются фотометрические измерения и знание распределения энергии

График распределения значений масс черных дыр, рассчитанных по светимости на длине волны 6 см для 2400 радиогалактик. По данным М. Хабибуллиной и О. Верходанова, 2011 г.

в спектре эллиптических галактик; оно определяется составом звездного “населения” и зависит от возраста звезд галактики. Это зависит от выбора оптимальной модели спектра, соответствующей фотометрическим данным. Тогда, используя максимальный возраст галактик из имеющихся в выборке на заданных z , можно построить огибающую кривую $t(z)$, характеризующую возраст Вселенной, и, как следствие, — определить динамику ее расширения. Последняя описывается параметрами плотности разных компонентов Вселенной, от которых зависит скорость ее расширения — параметр Хаббла $H(z)$.

ГРАВИТАЦИОННОЕ ЛИНЗИРОВАНИЕ

Открытие предсказанных Эйнштейном гравитационных линз дало мощный толчок в развитии методики измерения космологических параметров и поиске далеких объектов. Радиогалактики на этом пути были практически первыми объектами, которые применялись в качестве зондов при поиске гравитационных линз. Это связано и с тем,



что родительские галактики являются, в основном, самыми массивными галактиками скоплений, наиболее сильно искривляющими пространство.

Поисковые обзоры гравитационных линз важны для космологии. При внушительном числе зарегистрированных гравитационных линз оценку космологических параметров можно сделать большому их количеству на различных красных смещениях. Например, оценки, полученные в 2002 г. в обзоре неба CLASS на радиотелескопе VLA (США), показали, что доля материи во Вселенной составляет $\Omega_m = 0,31$. Гравитационные линзы в настоящий момент являются одним из наиболее важных независимых тестов при исследовании космологических параметров плотности материи. Кро-

ме того, фокусируя и усиливая проходящее около них излучение, они позволяют обнаружить далекие объекты, недоступные для наблюдения с помощью существующих инструментов. Таким образом (наряду с предоставлением возможности измерения параметров) линзы являются “гигантскими космическими телескопами” для исследования очень далекой Вселенной. Отметим, что самая первая гравитационная линза типа “эйнштейновское кольцо” наблюдалась в обзоре “Холод” на PATAH-600 и выглядела как двойной радиоисточник RC1131 + 0456 в созвездии Льва, и в 1988 г. в обзоре Мас-сачусетского технологического института была распознана как гравитационная линза.



СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Одной из главных проблем в исследовании далеких радиогалактик ($z > 3$) является проблема

Крупные инструменты, использовавшиеся в наблюдениях по программе "Большое Трио": а – радиотелескопы РАТАН-600 САО РАН, б – VLA (NRAO, США); в – оптический 6-м телескоп БТА САО РАН. Фото САО РАН и NRAO, США.



определения происхождения и скорости роста сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в их ядрах. Открытие радиогалактик на больших красных смещениях ($z = 5,19$ и $4,515$), когда возраст Вселенной составлял $1,1\text{--}1,3 \times 10^9$ лет, а квазаров 800–900 млн лет ($z = 6,43$ и $7,085$) после Большого взрыва – показало, что существует загадка быстрого образования СМЧД массами $10^9 M_{\odot}$ в самую раннюю эпоху. Быстрое (в течение 800 млн лет) образование черных дыр в рамках модели Λ CDM требует применения особых моделей, объясняющих такую скорость роста. Если формирование массивных черных дыр описывается

иерархической схемой (как и формирование их родительских галактик), то этот процесс должен быть быстрым и эффективным. Для объяснения существования СМЧД привлекаются и модели с первичными массивными черными дырами, сформировавшимися после Большого Взрыва (но до образования галактик).

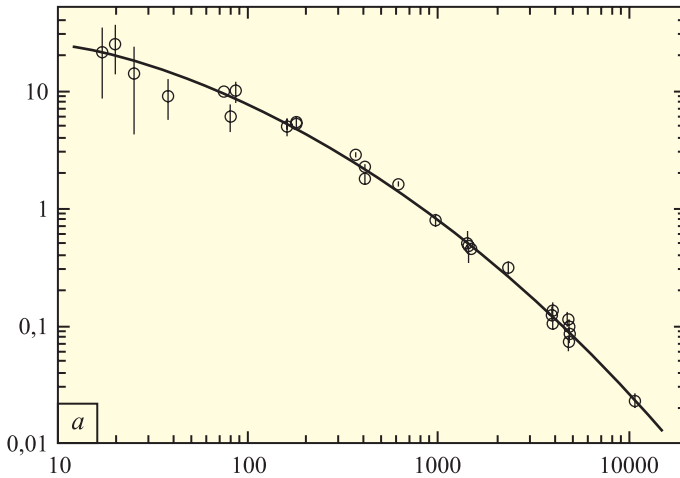
В рамках иерархической модели, соответствующей космологической модели Λ CDM, удастся объяснить рост СМЧД слиянием меньших черных дыр. Тогда максимум активности ядер галактик будет приходиться на $z = 2$. Наши оценки масс черных дыр для 2400 далеких радио-

галактик тоже помогают выделить эту эпоху массового слияния галактик, соответствующую иерархической модели.

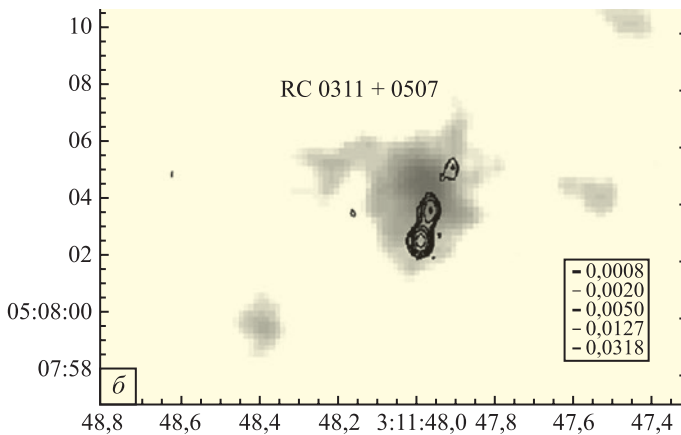
ПРОГРАММА “БОЛЬШОЕ ТРИО”

Российский проект “Большое Тριο”, проводимый в CAO РАН, также направлен на поиск и исследование далеких радиогалактик. Обзор исследований радиогалактик и результатов проекта “Большое Тριο” приведен в монографии авторов “Радиогалактики и космология” («Физматлит», 2009). Отбор кандидатов в далекие радиогалактики проходил в несколько этапов:

– селекция обнаруженных в обзоре “Холод” на



Графики радиоспектра источника RC J0311 + 0507 в созвездии Кита: а – спектральный индекс равен 1,31 в диапазоне частот 365–4850 МГц; б – наложение линий равной радиояркости (радиоизотоп) объекта RC J0311 + 0507 на изображение родительской галактики в фильтре R по данным БТА. По данным А. Копылова и других, 2006 г.



гия релятивистских частиц и магнитного поля, ожидаемый поток рентгеновского излучения с учетом комптоновского рассеяния реликтовых фотонов на космических лучах в радиокомпонентах; распределение по красному смещению и по цветовому возрасту звездного “населения”; оценка момента формирования родительской галактики, массы сверхмассивной черной дыры в их центре, темпов роста черных дыр);

– оценка космологических параметров по тесту “стандартные часы”.

В программе “Большое Трио” далекие объекты выбирались из источников с наиболее “крутым” радиоспектром. Это увеличивало вероятность того, что радиогалактика находится от нас далеко. Далее на радиоинтерферометре VLA строились карты радиоисточников и из них отбирались объекты типа FR II как более молодые и мощные.

ПАТАН-600 объектов по спектральным индексам с использованием низкочастотного (365 МГц) каталога Техасского обзора;

– картографирование этих объектов с помощью VLA с целью морфологической классификации и для уточнения их координат;

– оптическое отождествление по Паломарским картам (позднее и по другим обзорам: DSS2, SDSS);

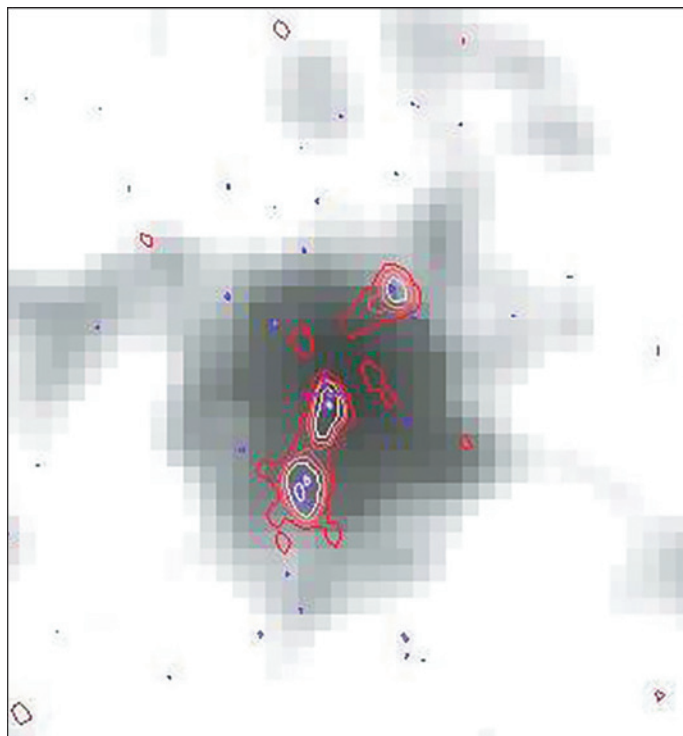
– желательная вторичная селекция объектов с признаками двойственности, характерными для FR II;

– глубокая многоцветная фотометрия (оценка фотометрических и цветовых красных смещений и цветового возраста звездного “населения”);

– спектроскопия наиболее интересных объектов;

– определение физических характеристик: расстояние, размеры, энер-

Радиогалактика RC J0311 + 0507, удаленная от нас на 12,5 млрд св. лет. На оптическое изображение, полученное на телескопе БТА, наложены линии равной радиояркости (радиоизофоты), демонстрирующие форму радиоисточника. Радиоизмерения сделаны на телескопе MERLIN (Великобритания). По данным Ю. Парийского и других, 2014 г.



Подготовленные списки источников использовались в фотометрических и спектральных наблюдениях на БТА.

Одним из выдающихся результатов программы “Большое Трио” стало обнаружение радиогалактики RC J0311 + 0507 (созвездие Кита) на красном смещении $z = 4,514$, когда возраст Вселенной составлял 1,3 млрд лет. Эта радиогалактика стала второй по дальности и первой из наиболее удаленных (дальше 12,5 млрд св. лет, или $z > 4$) по радиомощности. Оценка массы центральной сверхмассивной черной дыры по радиосветимости составила приблизительно $10^{10} M_{\odot}$, что говорит о ее быстром росте в ранние эпохи эволюции Вселенной.

Используя результаты программы “Большое Трио”, мы также провели космологический тест, связанный с возрастом звездного “населения” (по фотометрическим данным наблюдений БТА

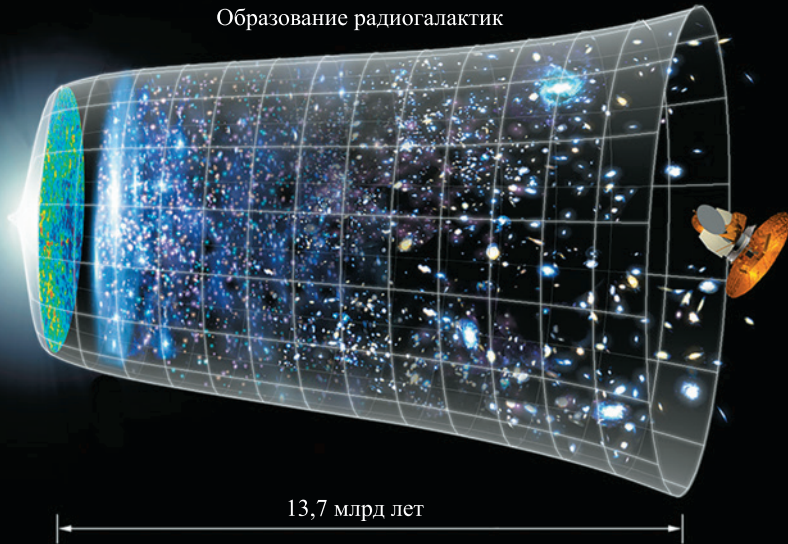
и других телескопов). Применяв этот подход для выборки далеких радиогалактик и гигантских эллиптических галактик скоплений, мы определили с точностью до 10% плотность материи ($\Omega_m = 0,2$) и темной энергии ($\Omega_{\Lambda} = 0,8$), а также постоянную Хаббла ($H_0 = 71,5 \text{ км/с/Мпк}$). Несмотря на различие параметров от измеренных позднее с помощью европейской космической обсерватории “Планк” (Земля и Вселенная, 2014, № 1), они не противоречили стандартной космологической модели ΛCDM . Важно отметить, что методы (с использованием цветowych и спектральных возрастов галактик)

основаны на измерении скорости расширения Вселенной с помощью физических процессов, связанных не с космологией, а с темпами термоядерных реакций в звездах.

Приведем важные результаты программы “Большое Трио”:

- построены радиоспектры объектов; 10% (104 источника) из них оказались “крутыми” (по данным PATAH-600);
- построены радиоизображения радиоисточников с секундным или с субсекундным разрешением (по данным радиointерферометра VLA);
- проведено сравнение в видимом свете радиоисточников с “крутыми

Образование радиогалактик



спектрами” с объектами Паломарского атласа неба и снимками 6-м телескопа САО РАН в глубоком обзоре;

- для 50 объектов (в основном, ярче 22^m) измерены красные смещения;

- подготовлен атлас оптических изображений радиогалактик и квазаров для RC-каталога;

- обнаружена радиогалактика с красным смещением $z = 4,514$ – вторая по дальности и первая среди очень далеких ($z > 4$) по радиомощности;

- оценены возрасты звездных систем и z их образования по фотометрическим данным и синтетическим моделям спектров;

- построена зависимость $t(z)$, по которой оценены космологические параметры Хаббла (H_0) и плотности темной энергии (Ω_Λ).

СОВРЕМЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Авторы рассмотрели основные этапы исследования радиогалактик, открытых на радиотелескопе РАТАН-600 в ходе выполнения программы “Большое Трио”. Удивительным фактом стало открытие среди относительно небольшого первичного списка радиисточников RC-каталога новой, второй по дальности среди известных, радиогалактики. Для небесных объектов программы

Современная модель этапов эволюции Вселенной. Эпоха возникновения первых радиогалактик соответствует возрасту Вселенной – 0,7–1,2 млрд лет. Рисунок NASA.

“Большого Трио” измерено множество физических параметров, характеризующих эволюцию звездного населения и сверхмассивных черных дыр в далеких радиогалактиках. Отметим, что изучение радиогалактик не ограничивается анализом их физических свойств, но позволяет понять эволюцию Вселенной. К настоящему времени мы, скорее всего, уже знаем стандартную космологическую модель,

соответствующую фундаментальным параметрам:

- известен химический состав Вселенной: ~75% H, ~25% He; малая часть (0,01%) включает остальные химические элементы;

- подтверждено существование реликтового излучения и его флуктуации (позволившие по данным космических обсерваторий “WMAP” и “Планк” определить все основные космологические параметры);

- определена крупномасштабная структура Вселенной;

- темная материя доминирует над видимой в галактиках и скоплениях галактик (по данным обсерватории “Планк”, плотность темной материи составляет $\Omega_{\Lambda\text{CDM}} = 0,259$, плотность видимой материи – $\Omega_b = 0,049$);

- Вселенная расширяется, ускоряясь (по данным обсерватории “Планк”; плотность темной энергии $\Omega_\Lambda = 0,691$, постоянная Хаббла $H_0 = 67,74$ км/с/Мпк).

Однако может оказаться, что существуют и “пропущенные” параметры в космологической модели ΛCDM , они измеряются независимо (как это случилось с плотностью темной энергии в конце прошлого века). Независимые космологические тесты, основанные на разнообразных данных (в том числе и по радиогалактикам), могут помочь в подобных исследованиях.

На радиотелескопе РАТАН-600 исследования радиогалактик продолжают. Строятся новые радиотелескопы –

SKA, ALMA, LOFAR, которые открывают новые возможности в исследовании радиогалактик, в понимании физики происходящих в них процессов; они позволяют заглянуть в эпоху формирования первых звезд и галактик, “увидеть” слияние сверхмассивных черных дыр. Можно ожидать, что дальнейшие исследования радиогалактик подарят нам еще много интересного.

Авторы выражают признательность своим коллегам, принимавшим участие в программе “Большое Трио” на разных этапах ее выполнения: Н.С. Соболевой (СПбФ СО РАН), О.П. Желенковой (САО), Уи. М. Госсу (НРАО, США), А.И. Копылову (САО) и А.В. Тамирову (СПбФ САО).

Информация

Эмиссионная туманность в Малом Магеллановом Облаке

В апреле 2016 г. с помощью 8,2-м телескопа VLT Европейской Южной Обсерватории (Параналь, Чили) астрономы получили снимок пылающего газового облака – эмиссионной туманности LHA 120-N55, или N55 (см. стр. 4 обложки). Она расположена на расстоянии 163 тыс. св. лет

в Большом Магеллановом Облаке, спутнике нашей галактики, в газопылевом сверхпузыре малой спутниковой галактики LKM 4. Туманность сформировалась в результате выдувания газа мощным звездным ветром и действия нескольких взрывных волн после вспышек сверхновых, но осталась нетронутой внутри сверхпузыря (такие образования диаметром сотни световых лет обнаружены в эмиссионных туманностях; Земля и Вселенная, 2013, № 1, с. 54). Это привело к тому, что внутри равномерно распределенных газовых слоев и космиче-

ской пыли, оставшихся после эволюции звезд, возникли пустоты. В ближайшие несколько миллиардов лет она будет менять свой облик и станет питать сверхновые. Яркие голубые звезды в туманности родились сотни миллионов лет назад, но уже после того, как образовалась туманность. Сейчас наблюдается процесс переноса атомов водорода ветром молодых звезд к окружающим газовым облакам.

Наблюдение туманности N55 позволит понять этапы возникновения новых поколений звезд.

Пресс-релиз ESO,
18 мая 2016 г.



Радиоизлучение микровязаров

С.А. ТРУШКИН,
доктор физико-математических наук
САО РАН

Рентгеновские двойные звезды с релятивистскими струйными выбросами – микровязары – уже более 25 лет вызывают огромный интерес мирового астрономического сообщества. Главная интрига исследований последних лет состоит в том, что большинство микровязаров содержат черные дыры, вокруг которых образуется горячий аккреционный диск из вещества с нормальной звезды, образующей с черной дырой тесную пару. Часть падающего вещества навсегда исчезает за го-



ризонтом событий, но другая под влиянием магнитного поля извергается с огромными скоростями в двух противоположных струях

из полярных областей аккреционного диска. Где-то вблизи черной дыры происходит генерация самого высокоэнергетического излучения – гамма-лучей сверхвысоких энергий. Удаляясь на значительное расстояние от двойной системы, в веществе струй начинают излучать быстрые электроны, создавая картину, знакомую исследователям далеких галактик и квазаров, – радиострую, или радиоджет. Именно джеты изучают радиоастрономы.

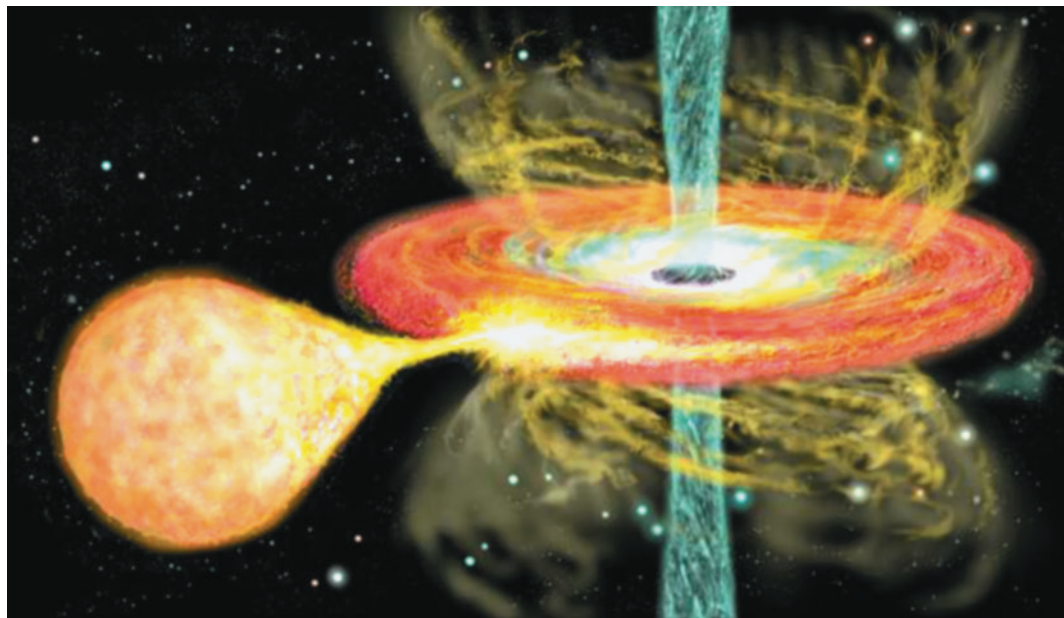
НЕМНОГО ИСТОРИИ

По расчетам эволюции самых массивных звезд, 100 миллионов черных дыр (ЧД) должны существовать в нашей Галактике. Подавляющее число этих таинственных объектов, предсказан-

ных еще в начале XX в., не создают никакого излучения, так как выпадение межзвездного газа на ЧД не в состоянии создать достаточно яркий световой “ореол” вокруг них, чтобы его увидеть на наземных или космических телескопах. Ну-

жен более интенсивный источник падающего вещества. И он был найден в процессе исследований звездообразования.

Давно известно, что звезды часто рождаются гравитационно-связанными парами, и часть из них находится на столь близ-



Так в представлении художника может выглядеть рентгеновская двойная система. Рисунок Р. Фендера.

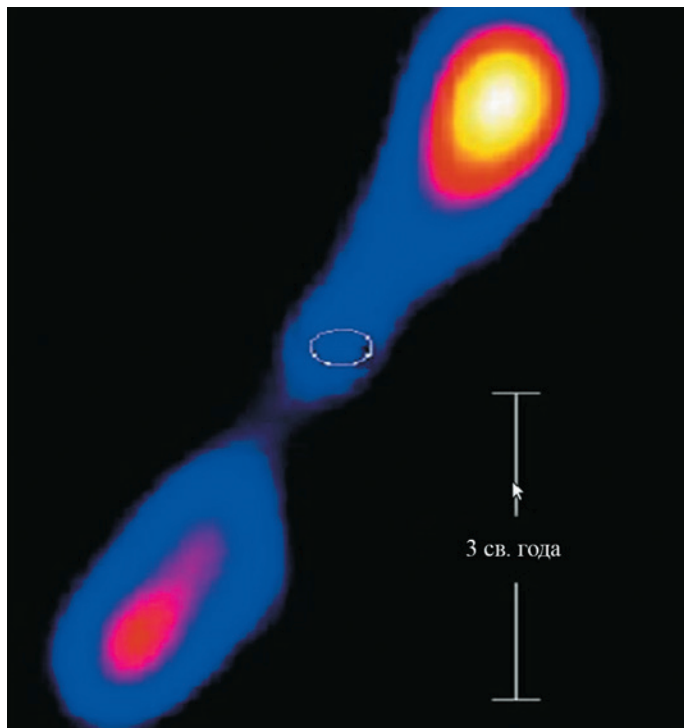
ких орбитах, что может происходить достаточно быстрый (по сравнению с их временем жизни) перенос вещества с одной на другую. Такую пару звезд называют тесной двойной системой. Это вещество, обладая заметным угловым моментом из-за орбитального движения, закручивается в аккреционный диск, прежде чем упасть в ЧД. Среди миллионов двойных звезд только в двух тысячах тесных систем содержатся нейтронные звезды (НЗ) или ЧД. Они представляют собой конечный продукт эволюции звезд с массой бо-

лее $8 M_{\odot}$. Такие тесные двойные системы с НЗ (или ЧД) были обнаружены еще в 1960-е гг. в пионерских рентгеновских исследованиях Рикардо Джакони, нобелевского лауреата по физике 2002 г., и стали первыми объектами рентгеновской астрономии (Земля и Вселенная, 2014, №№ 4 и 5). Такие тесные двойные системы получили название рентгеновские двойные (РДС). Их спектры настолько сильно отличались от рентгеновских спектров корон, что только необычным физическим явлением – аккрецией вещества на релятивистские звезды (ЧД и НЗ) – можно было объяснить эти спектры.

Обнаруженные объекты получали имена по названию своего созвездия и номера после буквы “X”

(например, один из ярчайших источников рентгеновского излучения Лебедь X-1 массой $14,8 M_{\odot}$). Каталоги содержат около 350 РДС, причем половина их имеет массу нормальной звезды-донора $M_n < 3 M_{\odot}$, а другая половина – массу $M_n > 3 M_{\odot}$. Рентгеновские двойные с ЧД или НЗ могут попасть в обе группы. Высокий темп аккреции вещества за счет переноса массы с “донора” позволил астрономам исследовать таинственные ЧД, измерять их массу и спин (момент вращения). У почти 50 РДС обнаружено радиоизлучение, 15 самых “радиоярких” наблюдаются в ежедневном мониторинге с помощью радиотелескопа РАТАН-600.

Большая часть изолированных ЧД пока остается недоступной



Микроквазар 1E1740.7-2942 в центре нашей Галактики. Радиоизображение получено в 2000 г. на волне 5 ГГц с помощью радиointерферометра VLA (NRAO, США).

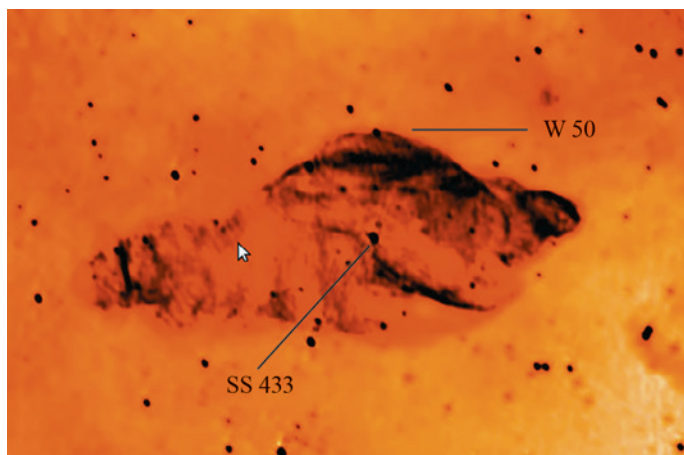
вызвать двойная система из ЧД и НЗ. Открытие даже одного такого объекта может стать “священным Граалем” для астрофизиков на долгие годы будущих исследований.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

В центре нашей Галактики находится сверхмассивная черная дыра с массой около $4 \times 10^6 M_{\odot}$. В центрах всех – активных и нормальных галактик – находятся сверхмассивные ЧД, диапазон масс которых составляет 10^4 – $10^9 M_{\odot}$. Обнаружение ЧД промежуточных масс (100 – $1000 M_{\odot}$) в других галактиках – задача ближайших лет. Состав РДС остается удивительно пестрым: и крошечные карлики (М), и массивные звезды ранних спектральных классов (ОВ) могут быть звездами-донорами. Разнообразны

для изучения. Вероятно, успехи таких инструментов, как лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория LIGO (США), в открытии гравитационного излучения от слияния двух черных дыр

станут толчком в развитии новой гравитационной астрономии, главным объектом которой будут ЧД в составе кратных систем (Земля и Вселенная, 1972, № 5; 1982, № 1; 1985, № 1; 2010, № 3). Особый интерес может



Остаток сверхновой W50 рядом с рентгеновской двойной SS433 в созвездии Орла. Первое изображение на волне 140 МГц получено в 2016 г. с помощью нового европейского интерферометра LOFAR. По данным Д. Бродерика и др. (2016).

их орбитальные свойства – круговые, вытянутые, прецессирующие, быстрые собственные движения за счет несимметричного взрыва сверхновой, в процессе которой рождаются ЧД и НЗ. Вероятно, такие новые международные инструменты, как космическая обсерватория “Радиоастрон” и радиоинтерферометр нового поколения SKA, обнаружат сотни или тысячи РДС.

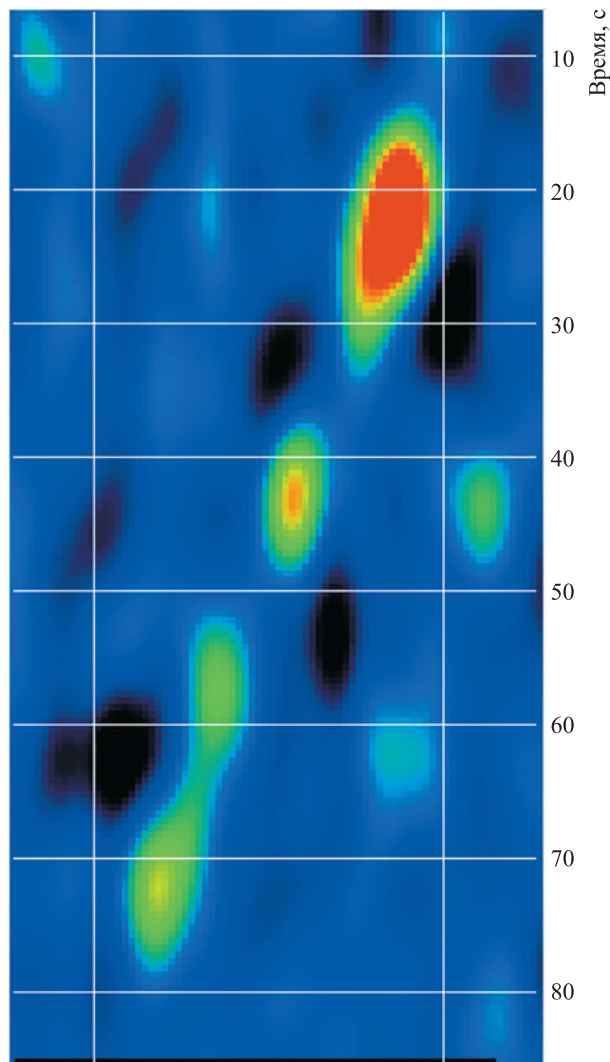
Рентгеновские двойные классифицируются по системе, основанной на свойствах рентгеновского спектра: считается, что если темп аккреции вещества на ЧД увеличивается, то двойная система совершает переход из жесткого (и часто спокойного) в мягкое состояние. Это видно по отношению потока на энергиях ниже (скажем, 10 кэВ) к потоку на более высоких энергиях: то есть существенно меняются свойства аккреционного диска и так называемой “горячей короны” вокруг него. Нетепловое излучение короны, которое образуется в результате обратного комптоновского рассеяния оптического излучения звезды на релятивистских электронах, может стать заметно ярче на высоких энергиях, чем тепловое излучение самого менее горячего диска. В мягком состоянии рентгеновский спектр действительно становится “чернотельным” (определялся формулой План-

ка) – характерным для вещества во внутренних областях оптически толстого аккреционного диска.

Активный поиск черных дыр в рентгеновских двойных системах продолжался 20 лет с помощью космических рентгеновских обсерваторий “Чандра”, “ХММ-Ньютон” и “Интеграл” (Земля и Вселенная, 2003, № 6; 2008, № 5; 2011, № 2). В 1989 г. запустили советско-французскую космическую обсерваторию “Гранат”, оснащенную телескопом SIGMA рентгеновского и гамма-диапазона, способную локализовать источники с беспрецедентной в то время точностью (Земля и Вселенная, 1989, № 3; 1993, № 6). Французский и аргентинский астрофизики Ф. Мирабель и И. Родригез пришли к выводу, что рентгеновские двойные будут испускать синхротронное радиоизлучение в случае ускорения частиц до высоких энергий в присутствии магнитного поля. На “Гранате” ученые выполнили наблюдения объекта 1E1740.7-2942 – источника из первого каталога, составленного в космической обсерватории “Эйнштейн”. Одновременно проводились исследования на радиоинтерферометре VLA (NRAO, США). Объект был выбран не случайно: его светимость, переменность и рентгеновский спектр точно соответ-

ствовали свойствам аккреционного диска вокруг такой же ЧД, как в Лебедь X-1, тогда считавшемся “лучшим кандидатом” в черные дыры. Микроквазар 1E1740.7-2942 оказался самым ярким жестким рентгеновским источником в центре нашей Галактики. Но самое замечательное было то, что в его жестком спектре обнаружили линию 511 кэВ как результат процесса аннигиляции электронов и позитронов. Самым подходящим местом рождения пар из-за взаимодействия гамма-фотонов можно считать внутренние области аккреционных дисков. Этот процесс эффективен тогда, когда размер источника мал – имеет радиус около 3–10 гравитационных радиусов ЧД звездной массы, что равно 30–100 км. В другом микроквазаре V404 Лебедя также была обнаружена линия аннигиляции в гамма-спектре после вспышки летом 2015 г. Вероятно, многие, если не все, микроквазары в активной фазе эволюции обладают способностью рождать позитроны, то есть антиматерию.

Радиоизображение 1E1740.7-2942 удивительно напоминало карты радиогалактик, к тому времени полученных с помощью различных интерферометров и РСДБ-систем (см. статью О.В. Верховоданова и Ю.Н. Парийского в этом номере). Астрономы увидели вы-



Микроквазар 1E1740.7-2942. Радиоизображение получено в 2000 г. на волне 5 ГГц с помощью радиоинтерферометра VLA (NRAO, США). По данным Ф. Мирабеля и др. (1992).

ская новая GRS1915 + 105 в Орле, позже давшая имя всем подобным объектам микроквазары, затем с помощью телескопа SIGMA определены координаты этого источника с невысокой точностью $\pm 3,5'$. Поэтому испанский астрофизик А. Кастро-Тирадо попросил Ф. Мирабеля провести на радиоинтерферометре VLA картографирование области вокруг GRS1915 + 105, и он обнаружил переменный относительно яркий радиоисточник. Его точные координаты позволили сделать однозначное его отождествление со звездой в ИК-диапазоне. Ф. Мирабель и И. Родригез наметили серию картографирований GRS1915 + 105 на VLA с целью “разрешить” объект на компоненты. Это удалось сделать весной 1994 г. во время яркой вспышки. Каково же было их удивление, когда они нашли видимое “сверхсветовое” расширение объекта! Кажущееся движение со скоростью больше скорости света есть следствие релятивистской теории, когда источник излучения движется со скоростью, близкой к ско-

бросы на расстоянии 6 св. лет по обе стороны от центрального компактного радиоисточника. Струи этого “великого аннигилятора” совсем не типичны для других микроквазаров, так как обычно их удается зарегистрировать на расстоянии не дальше 10 тыс. а.е. от двойной системы. Стоит заметить, что временные масштабы переменности ядер активных галактик

и микроквазаров различаются в сотни миллионов (если не миллиардов) раз, что отражает характерное соотношение масс объектов.

ПЕРВЫЙ МИКРОКВАЗАР

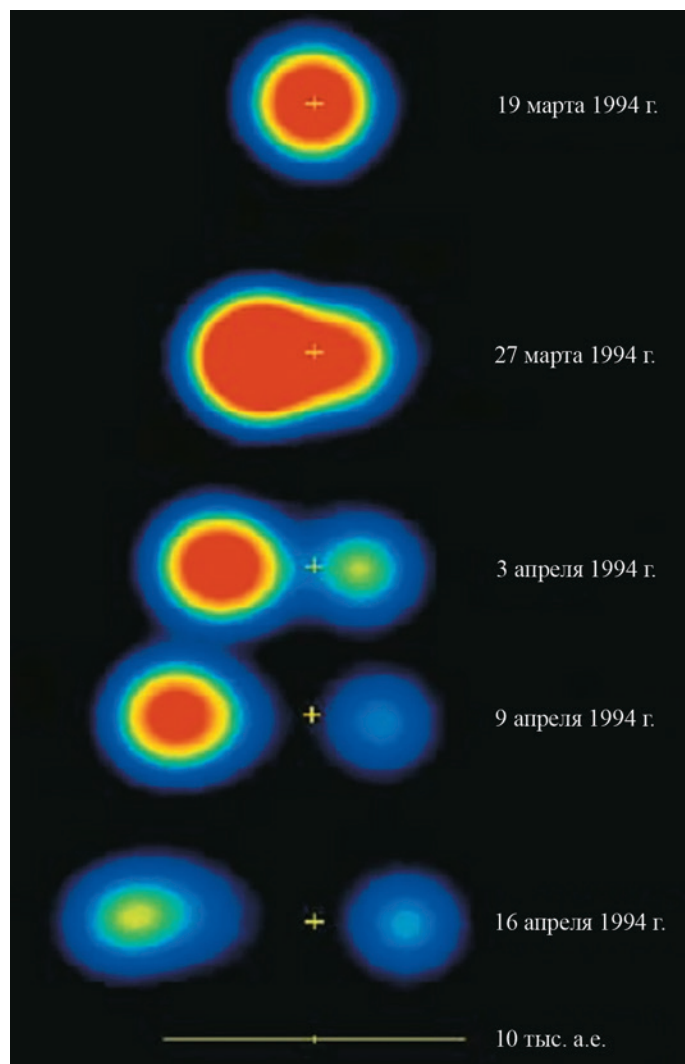
В августе 1992 г. с помощью рентгеновского монитора всего неба WATCH космической обсерваторией “Гранат” была открыта рентгенов-

След “сверхсветового” движения радиокомпонента микроквара *GRS1915 + 105* в созвездии Орла. Радиоизображение получено в марте–апреле 1994 г. на волне 5 ГГц с помощью радиоинтерферометра VLA (NRAO, США). По данным Ф. Мирабеля и И. Родригеса (1994).

рости света под малым углом к лучу зрения наблюдателя. Подобный эффект многократно наблюдался во многих активных квазарах и радиогалактиках (например, в 3C279 и 3C120). Теперь оказалось, что и в микрокварах возможны релятивистские скорости движения струй – джетов. Струи в *GRS1915 + 105* разлетались со скоростью 0,92 от скорости света, а угол вектора скорости к лучу зрения был равен 70° . Кинетическая мощность струй составляла рекордную величину около 10^{40} эрг/с. В более поздних измерениях, в конце 1997 г., на интерферометре MERLIN было также обнаружено видимое сверхсветовое расширение, но скорость была еще выше: 98% скорости света, когда угол луча зрения составлял 66° .

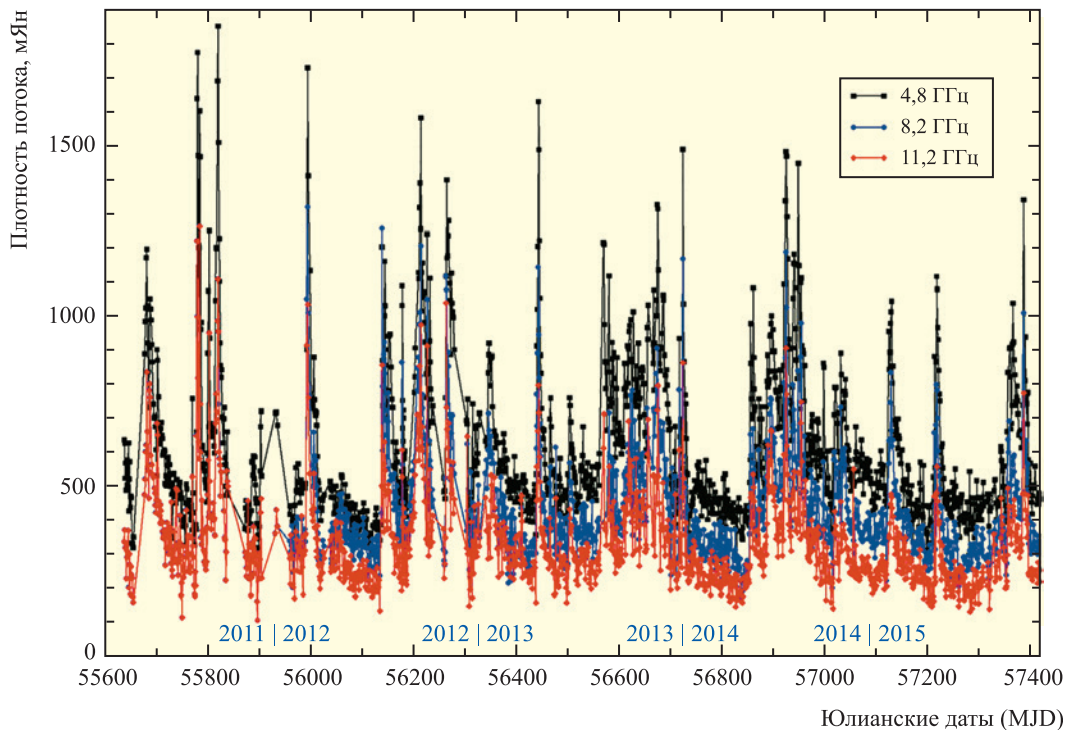
МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУЙ

В конце 1990-х гг. американские астрофизики Р. Бланфорд и Р. Знак предложили механизм процесса формирования



струй – передавать вращательную энергию от керровской (обладающей угловым моментом) ЧД к струе. Создание и ускорение струи контролируется магнитным полем, в основании струи оно может достигать 10^7 Гс. Дальше эволюция радиоизлучения в струе определяется внутренними ударными волнами, которые ускоряют электроны (и, возможно, позитроны)

до таких энергий, когда они способны испускать синхротронное излучение в инфракрасном и радиодиапазонах. В рентгеновском, инфракрасном и радиодиапазонах наблюдались квазипериодические осцилляции потока в течение времени существования аккрецирующего вещества в диске на последней стабильной орбите. Ученые пришли к заключению,



что GRS1915 + 105 содержит ЧД массой около $10 M_{\odot}$ и звезду F-класса массой $M_{\odot}$.

Как влияют темп аккреции и рентгеновские состояния (поток излучения в разных частях рентгеновского спектра) на формирование и эволюцию струй? Ответы на эти вопросы сформулированы в струйной парадигме, то есть в сцепке процессов формирования струй и аккреции вещества на релятивистский объект (ЧД). Очевидно, что исследования надо проводить одновременно в максимально широком диапазоне спектра – от радиоволн до гамма-излучения.

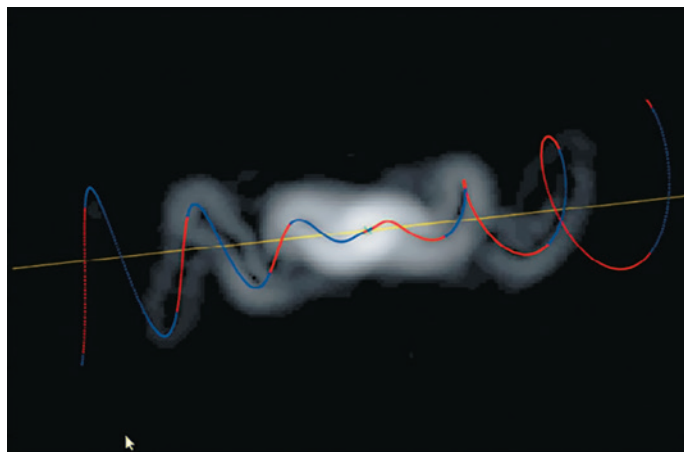
Автор со своими многолетними данными мо-

нитинга радиопотока на радиотелескопе РАТАН-600 участвовал во многих программах исследования GRS1915 + 105 и других микроквазаров. В GRS1915 + 105 детектированы яркие радиовспышки, коррелирующие с повышением потока в мягком рентгеновском диапазоне. Внутри системы обязательно формируются релятивистские струи; именно в них происходят мощные радиовспышки – это разлетающиеся облака синхротронно-излучающих релятивистских частиц. Короткие (менее 60 а.е.) компактные струйные выбросы, вероятно, существуют в объекте почти постоянно, и их мы

График кривых блеска SS433 на трех частотах, измеренных на РАТАН-600 в 2013–2016 гг. Источник показал множественную вспыхивающую активность разной яркости и продолжительности. САО РАН.

видим как оптически толстый источник по спектру полного потока в радиодиапазоне. Если в джете развиваются внутренние ударные волны, то и скорость его движения, интенсивность радиоизлучения и линейная поляризация быстро (в течение нескольких часов) вырастают в несколько раз, а спектр излучения становится оптически

Рентгеновская двойная система SS433 в созвездии Орла. Радиоизображение получено в 2006 г. на волне 5 ГГц с помощью радиоинтерферометра VLA с применением специального увеличивающего контраст деталей фильтра (NRAO, США). На снимок нанесена кинематическая модель движения струй. По данным К. Бландел и М. Болера (2003).



тонким. Причина генерации внутренних ударных волн не совсем понятна, но, вероятно, она связана с нестационарным потоком вещества, попадающего в джеты из аккреционного диска. Процессы в близкой к керровской черной дыре области крайне неустойчивы: часть вещества “проваливается” под горизонт событий и навсегда исчезает для внешнего наблюдателя, а часть вещества устремляется в струи, и там создаются условия ударного взаимодействия.

Новые тонкие расчеты внутренней структуры диска и сравнение временных параметров рентгеновского излучения позволили оценить спин черной дыры в GSR1915 + 105: $a = 0,98$. Какой физический процесс привел к экстремальной раскрутке столь массивной ЧД? Напрашивается единственный ответ: этот угловой момент “приобретен” в момент рождения

ЧД при коллапсе массивной звезды. Но тогда и она должна обладать очень высокой скоростью вращения. Альтернативным объяснением служит довольно длительный процесс медленной аккреции вещества на ЧД; в результате раскрутки старого радиопульсара в двойной системе возникает миллисекундный пульсар.

SS433 и ДРУГИЕ МИКРОКВАЗАРЫ

Объект GSR1915 + 105 исключительно интересен для астрофизиков, но есть другие объекты с отличительными признаками микроквazarов. В 1970-е гг. английские астрофизики Д. Кларк и П. Мурдин искали звездные остатки взрывов сверхновых звезд. Они обнаружили, что объект A1910 + 04 вблизи центра остатка сверхновой W50 в созвездии Орла является переменным рентгеновским и радиоисточником,

а его оптический спектр казался очень необычным. Почти сразу стало ясно, что это А-звезда под № 433 из каталога ярких эмиссионных звезд (LS) Б. Стефенсона и Н. Сандулека (1977) и радиоисточник из 4C-каталога (четвертый Кембриджский радиообзор на волне 178 МГц), опубликованный в 1967 г. Оптический спектр с “подвижными” эмиссионными линиями водорода и нейтрального гелия удалось объяснить с помощью модели двойного выброса – когда оптическое излучение идет из прецессирующих струй, движущихся от двойной системы со скоростью 78 тыс. км/с. Впервые астрономы столкнулись с возможностью природы ускорить сгустки вещества до субрелятивистских скоростей.

В статье в журнале “Nature”, опубликованной в конце 1978 г., нобелевский лауреат по физике (1974), британский астрофизик М. Райл с колле-

гами сформулировали идею о том, что затменная рентгеновская двойная система SS433 с ЧД (расположена в 5 кпк от нас; Земля и Вселенная, 1980, № 4) – это новый тип радиозвезд. Она очень напоминает внегалактические объекты, подобные знаменитому блазару BL Lac в созвездии Ящерицы (принадлежащий к ядрам активных галактик, $z = 0,069$). Важно было бы найти в Галактике полный аналог BL Lac – микроблазар (источник, струя которого направлена точно в сторону Земли). Такой источник показывал бы очень высокую яркость за счет релятивистского усиления потока, а сама яркость менялась бы в масштабе нескольких секунд. Как показывают расчеты с применением формул специальной теории относительности, принимаемое излучение от источника синхротронного излучения, который движется на наблюдателя, будет усиливаться вследствие эффекта Доплера – подобно тому, как меняется частота гудка от приближающегося поезда. И, действительно, во многих источниках джет, направленный на нас, выглядит ярче, чем джет, направленный от нас. И, хотя в некоторых микрокварах эффект “биминга” проявляется в высокой степени асимметрии яркости струи в направлении

наблюдателя, но микроблазары пока не обнаружены, так как струи в них сильно коллимированы – то есть развернуты на угол $1-3^\circ$. Вероятность обнаружить такой объект со струей, направленной прямо на нас, в выборке и без того редких объектов крайне мала.

В 1981 г. выдающимся американским радиоастрономом Р. Джелмингом был впервые картографирован SS433 с помощью интерферометра VLA. Радиокарты SS433 определенно выявили меняющую яркость структуру джета, прецессирующую с периодом в 164 сут. Впервые в галактическом объекте – рентгеновской двойной – были открыты струйные выбросы.

Американским астрофизиком Б. Маргоном с коллегами была предложена кинематическая модель прецессирующих струй, в которых движется “изучающее подвижные эмиссионные линии” вещество.

Модель удивительным образом точно соответствовала общей картине всех наблюдений. В 1988 г. Р. Джелминг написал обзор “Радиозвезды” в классическом сборнике сотрудников NRAO “Галактическая и внегалактическая радиоастрономия”, где он в деталях описал не только наблюдательные данные о рентгеновских двойных, но и привел теоретические выкладки по

механизмам радиоизлучения радиозвезд и рентгеновских двойных. В том же году Р. Джелминг и К. Джонсон предложили численную модель радиоизлучения струй в SS433, основанную на генерации синхротронного излучения релятивистских частиц внутри движущихся по баллистической траектории сгустков. Картина настолько хорошо соответствовала изображению SS433, полученным на VLA в 1981 г., что эта модель полых расширяющихся (в начале расширения оптически толстых, а потом оптически тонких) прецессирующих струй стала рабочей моделью и для SS433, и микрокварах. РДС нельзя увидеть как изображение двух звезд с аккреционным диском вокруг ЧД/НЗ; это представление – только следствие теории, согласованной со множеством наблюдательных фактов. Радиоструи, действительно, видны на изображениях SS433 и других микрокварах, полученных методами радиоинтерферометрии с разрешением – от одной угловой миллисекунды до одной угловой секунды.

ПАТАН-600 И МИКРОКВАЗАРЫ

В 1979 г. на радиотелескопе ПАТАН-600 начаты первые наблюдения SS433. Глубокий обзор “Холод” Ю.Н. Парийский решил прово-

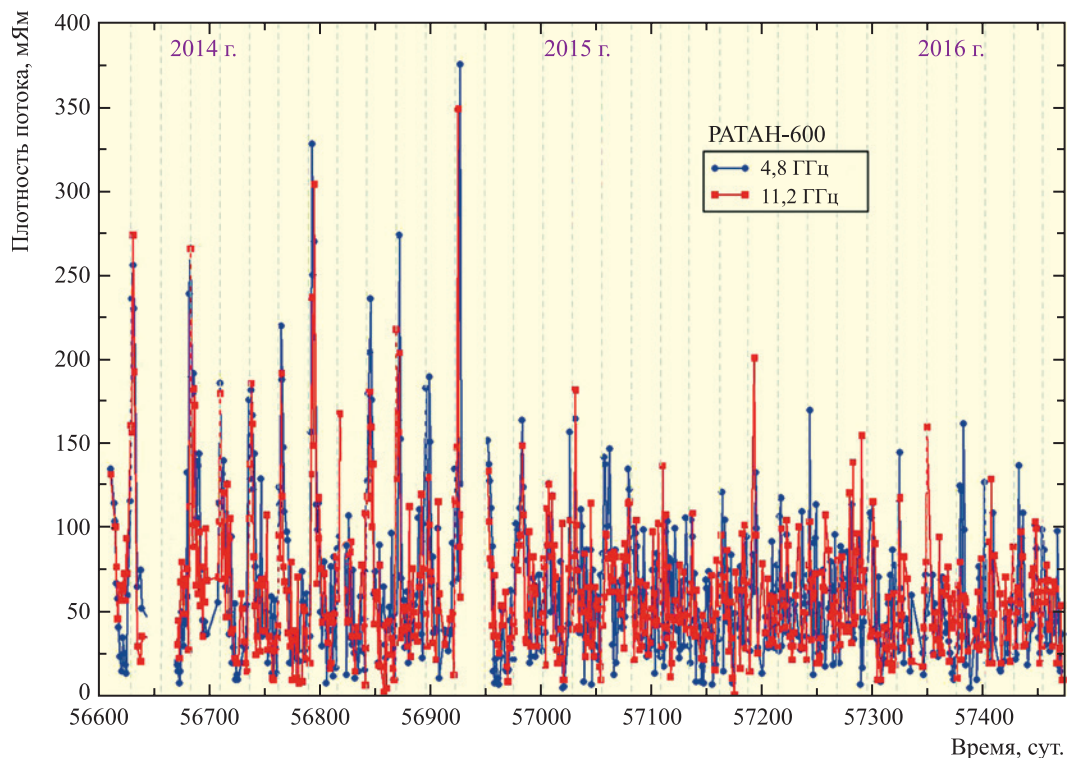


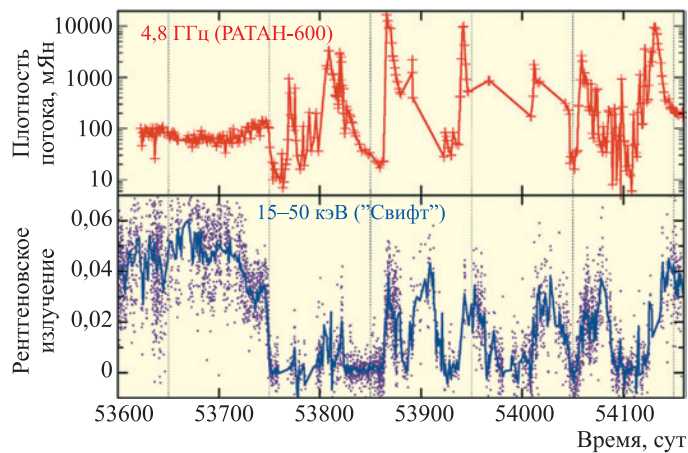
График кривой блеска микроквара LSI + 61d303, измеренный в 2013–2016 гг. на ПАТАН-600 (САО РАН). Отмечены фазы 0,6-орбитального периода, когда обычно происходят радиовспышки.

дять на склонении SS433 (см. статью О.В. Верходанова и Ю.Н. Парийского в этом номере). Стоит отметить, что, хотя SS433 – сильно переменный радиоисточник и его поток может меняться в несколько раз, в 100-дневном цикле “Холод-1” SS433 был удивительно стабилен. Эту особенность SS433 мы неоднократно наблюдали позже – активные и спокойные состояния объекта мо-

гут длиться 50–200 сут. В кривых спокойного радиоблеска автор нашел слабую модуляцию потока – и с орбитальным периодом 13,1 сут, и с периодом 6,5 сут. Очевидно, что эта модуляция связана с покачиванием струй из-за нутационных движений звезд в системе.

Рост чувствительности радиометров ПАТАН-600 позволил расширить исследования менее ярких микрокваров. Автор наблюдал микроквар LSI + 61d303 в Кассиопее – объекте, на который первыми обратили внимание канадские радиоастрономы Р. Грегори и А. Тейлор в 1984 г., когда они проводили обзор плоскости Галактики на

90-м телескопе NRAO на частоте 4,8 ГГц с целью обнаружить новые переменные радиоисточники, которые можно было бы связать с объектами, подобными SS433. Действительно, ученым удалось найти переменный источник GT0236 + 61 (GT – имя каталога по фамилиям авторов обзора), отождествленный со звездой LSI + 61d303, в состав которой входит Ве-звезда. Он оказался не только ярким рентгеновским источником и оптической звездой, но был единственным радиоисточником с периодическими вспышками, которые следовали с орбитальным периодом 26,5 суток.



Графики кривых блеска рентгеновской двойной Лебедя X-3 в период активности микроквара, измеренные в диапазоне на волне 4,8 ГГц на РАТАН-600 (САО РАН) и космической обсерваторией “Свифт” в диапазоне 15–50 кэВ в 2008 г. Видна корреляция всплещного рентгеновского и радиоизлучения, обусловленная формированием струйных выбросов и переизлучением оптических квантов звезды Вольфа – Райе в рентгеновские кванты.

Когда удалось определить параметры орбиты РДС, то стало ясно, что эти всплшки происходят после прохождения периастроны (точки максимального сближения) Ве-звезд и релятивистского объекта. Видимо, в процессе сближения происходит бурная аккреция вещества на ЧД (или НЗ), после чего формируются струйные выбросы, которые мы видим как периодические всплшки. Из-за трудностей определения угла наклона орбиты системы до сих пор не удалось точно определить массу компактного компонента, поэтому существуют альтернативные модели – и с ЧД, и с НЗ. Жаркие споры разгорелись по интерпретации радиокарт, полученных на интерферометре VLBA (США) в течение одной орбиты. По мнению американского радиоастронома В. Давана, большая ось распределения радиояркостности объекта всегда была направлена в сто-

рону оптической звезды, что скорее напоминало ориентацию хвоста кометы, чем обычный для микрокваров струйный выброс.

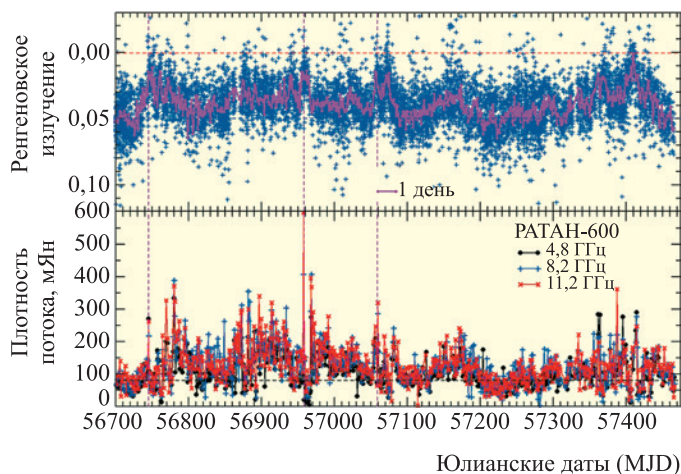
Немецкий астрофизик М. Масси придерживается точки зрения, что релятивистские быстро прецессирующие струйные выбросы создают основной узор и мы имеем дело с типичной для микрокваров картиной образования струй в процессе аккреции на ЧД или НЗ. Если первая точка зрения, скорее, предполагает взаимодействие пульсарного ветра или магнитосферы НЗ с дисковым ветром Ве-звезды, то М. Масси настаивает на образовании струй во время периодически возникающей из-за сильной вытянутости орбиты системы аккреции вещества на ЧД. Весь спор сильно “подогревает” открытие гамма-излучения высокой энергии – от LSI + 61d303. На примере этой РДС астрофизики поняли, что микроква-

ры могут быть мощными источниками излучения самых высоких энергий, измеряемых в тераэлектронвольтах (!).

Начиная с 2013 г., автор проводит почти ежедневные наблюдения системы на двух частотах, чтобы полностью покрыть измерениями один орбитальный период. Уже измерены кривые блеска в течение более 30 орбитальных периодов, то есть получены данные на частоте 4,8 ГГц по 30 радиовсплшкам от LSI + 61d303. Свойства всплшек заметно поменялись с изменением фазы открытого Б. Грегори 4,6-летнего периода, однако мы подтвердили стабильность орбитального периода: $26,5 \pm 0,02$ суток.

Другим источником постоянного мониторинга является не менее интересная рентгеновская двойная Лебедь X-3, состоящая, скорее всего, из ЧД и находящейся на орбите звезды Вольфа – Райе (29 тыс. св. лет от

Графики кривых блеска рентгеновской двойной Лебедь X-3 в спокойный период микроквазара, измеренные в 2013–2016 гг. на РАТАН-600 (САО РАН) и с помощью космической обсерватории “Свифт” в диапазоне 15–50 кэВ. Обнаружена высокая степень (0,9) антикорреляции рентгеновского и радиоизлучений. Ось рентгеновского потока для наглядности направлена вниз.



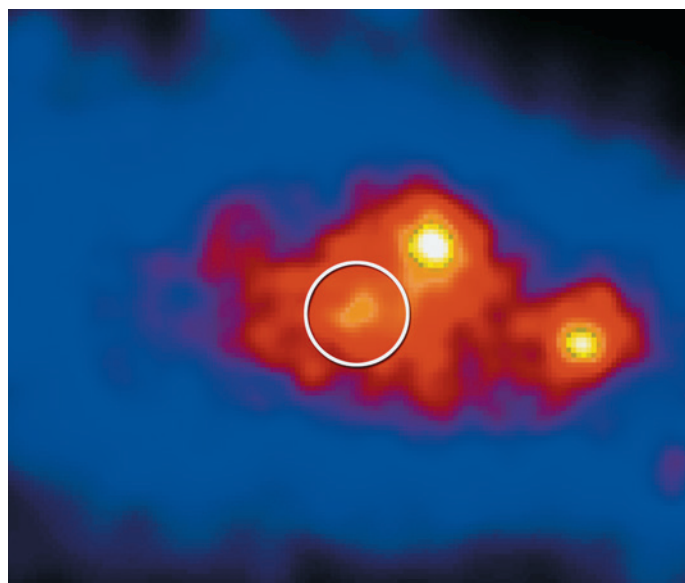
нас). Летом 2009 г. во время мощной радиовспышки нам с помощью итальянского научного спутника “AGILE” удалось обнаружить гамма-излучение от РДС Лебедь X-3 на энергиях выше 0,5 ГэВ. Таким образом, еще один микроквазар показал способность излучать кванты самых высоких энергий. С момента драматического открытия в 1972 г. Б.Р. Грегори серии гигантских радиовспышек, когда поток вырос от 0,1 Ян до 22 Ян, микроквазар стал третьим по яркости радиоисточником в на-

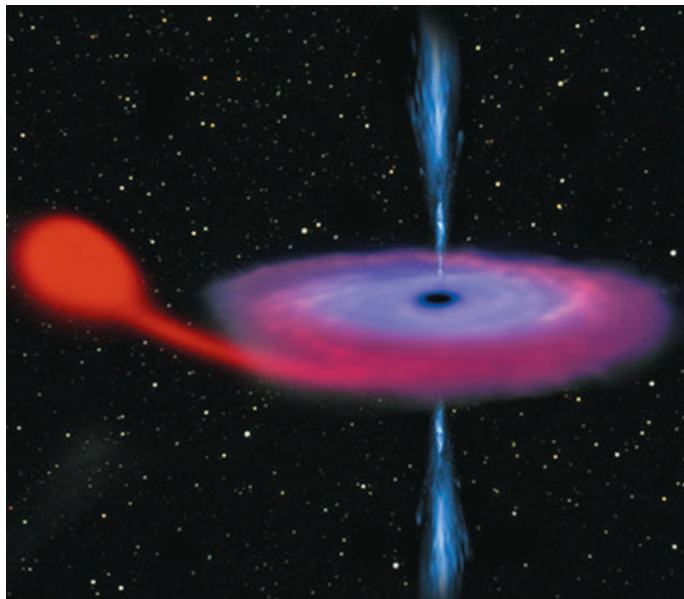
шей Галактике после остатков исторических сверхновых Крабовидной туманности и Кассиопеи А (Земля и Вселенная, 2008, № 1).

С тех пор источник несколько раз вспыхивал до подобного уровня потока, и многие вспышки были измерены на РАТАН-600. Во всех случаях мощные вспышки

можно интерпретировать как кратковременную (в течение 1–3 сут) генерацию облака релятивистских электронов внутри быстро расширяющегося струйного выброса вещества. Работает численная модель движущихся с релятивистской скоростью отдельных струйных сегментов, излучающих и поглощающих

Область гамма-излучения вокруг микроквазара Лебедь X-3 (обведена кружком), состоящего из черной дыры и звезды Вольфа – Райе. Самые яркие источники гамма-излучения, как правило, – РДС. Изображение получено 26 ноября 2009 г. с помощью телескопа LAT на космической гамма-обсерватории “Ферми”. Фото NASA.





Художественное представление рентгеновской двойной V404 Лебеда. Источник включает нормальную звезду, от которой под действием гравитации течет вещество на черную дыру, закручиваясь в тонкий диск и постепенно разогреваясь до температуры теплового рентгеновского излучения. Яркие струи образуются, если темп аккреции приближается к критическому, обусловленному пределом Эддингтона.

синхротронное излучение, предложенная испанским астрофизиком Х. Марти с коллегами в 1992 г. На основе этой модели во всех вспышках движение вещества в струе считается умеренно релятивистским, обладающим скоростью, равной 0,3–0,6 скорости света.

Следует упомянуть диаграмму эволюции рентгеновского излучения (HID): “жесткость – светимость”. Оказалось, что все микроквазары с ЧД в рентгеновском диапазоне ведут себя одинаково – активность начинается с жесткого низкого состояния, переходит в высокое, сдвигается в сторону мягкого и высокого, затем совершает несколько возвратных движений в промежуточном состоянии (при этом возможны яркие радиовспышки – формирование релятивистского джета); нако-

нец РДС возвращается в исходное состояние. Британский астрофизик Р. Фендер с коллегами построил логически связанный сценарий, в котором все стадии эволюции определяются соотношением темпа аккреции, геометрией короны и диска и формированием струй. Удалось связать эту картину с эволюцией излучения (активности) ядер активных галактик и квазаров, у которых существуют подобные фазы эволюции. В очередной раз для аналогии квазары–микроквазары нашлось физическое обоснование.

В изучении свойств аккрецирующих черных дыр во всем спектре масс, светимостей, типов объектов и струй принимали участие многочисленные группы ученых. Возникла идея нанести на один график “светимость дже-

та – рентгеновская светимость” все активные источники с аккрецирующими ЧД. Оказалось, что они – от РДС, центральной ЧД в Млечном Пути, к далеким радиогалактикам – подчиняются одной зависимости, получившей название “фундаментальная плоскость”. В результате можно говорить о том, что существует таинственный механизм, который объединяет все аккрецирующие ЧД. Оказалось, что светимость джета (радиосветимость) пропорциональна рентгеновской светимости диска в степени 0,7 (если все величины нормировать на единицу массы аккрецирующей ЧД).

МИКРОКВАЗАР V404 ЛЕБЕДЯ

Удивительная способность микроквазаров испускать кванты от радио-

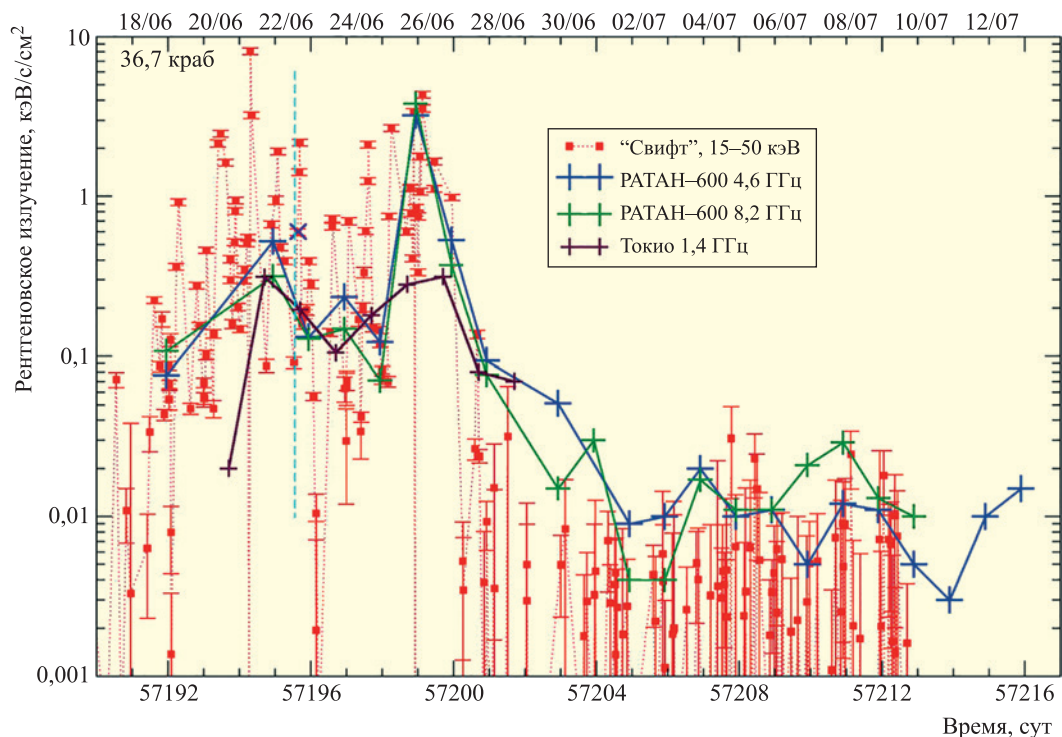


График кривой блеска рентгеновской новой V404 Лебедя в течение вспыхеchnого состояния, измеренный в июне 2015 г. на РАТАН-600 (САО РАН) и с помощью космической обсерватории «Свифт» в диапазоне 15–50 кэВ.

частот и гамма-лучей привела к тому, что изучение этих объектов входит в ключевые программы всех крупных космических обсерваторий и многих наземных телескопов. Только так можно зарегистрировать необычные явления сразу на многих телескопах.

Летом 2015 г. произошло важное событие в астрофизике микроквазаров — после 26-летней спячки «проснулся» ми-

кроквазар V404 Лебедя (GS2023 + 338). Рентгеновская маломассивная двойная звезда GS2023 + 338 была открыта во время вспышки 22 мая 1989 г. с помощью японской космической обсерватории «Гинга» («Ginga»). Рентгеновский поток достигал 17 крабов, то есть в 17 раз превосходил поток от знаменитой Крабовидной туманности в диапазоне энергий 10–35 кэВ. Тогда оптический объект увеличил свою яркость почти на 7^м, достигая яркости 11,6^м в фильтре V, то есть объект можно было наблюдать в любительский телескоп. Он оказался повторной новой V404 Лебедя (переменная звезда), которая уже вспыхивала в 1938 г.

и 1956 г. В 1990-е гг. система была динамически разрешена в оптических спектроскопических измерениях. На расстоянии 7400 св. лет от Земли на орбите с периодом 6,5 сут в двойной системе находятся два звездных объекта: ЧД массой около 11 M_☉ и оранжевый субгигант — звезда класса K0 массой 0,3–0,5 M_☉ и температурой фотосферы 4700 К. По-видимому, это РДС, в которой субгигант, заполняя свою полость Роша, передает вещество на ЧД, в результате образуется горячий аккреционный диск, который постепенно заполняется для того, чтобы стать достаточно вязким и разогреться настолько, что система

становится хорошо видно в рентгеновском диапазоне. Расстояние было определено по измерениям годичного параллакса радиоизлучения от V404 Лебеда с помощью американской интерферометрической системы VLA + VLBA + GBT. В этой РДС нерегулярно возникают релятивистские выбросы вещества из внутренних частей около ЧД.

15–26 июня 2015 г. рентгеновский поток от V404 Лебеда в диапазоне 15–50 КэВ достигал 40 крабов; по измерениям российско-европейской космической обсерватории «Интеграл» (60–300 кэВ) был даже ярче – поток доходил до 50 крабов, то есть в несколько тысяч раз превышал спокойное состояние, которое продолжалось 26 лет. В указанные дни автор ежедневно регистриро-

вал радиоизлучение на пяти частотах – 2,3, 4,6, 8,5, 11,2 и 21,7 ГГц – с помощью радиотелескопа PATAN-600 на уровне 50–500 мЯн. 26 июня, спустя несколько часов после яркого рентгеновского всплеска, радиопоток V404 Лебеда вырос в 30–40 раз: от 0,05 янских (в предыдущий день) до 4 янских, что в несколько раз превышает максимальный уровень потока вспышки 1989 г. Он оказался исключительно высоким из всех микрокваров.

Нам посчастливилось зарегистрировать сам момент формирования релятивистского струйного выброса вещества из полюсов аккреционного диска вокруг черной дыры. Во время ярких рентгеновских вспышек V404 Лебеда в его гамма-спектре была зафиксиро-

вана аннигиляционная линия на энергии 511 кэВ; это говорит о том, что и этот источник является поставщиком антиматерии в МЗС.

Итак, микроквары (объекты с ближайшими к нам ЧД) представляют непреходящий интерес как для астрофизиков, так и для физических лабораторий, в которых на основе огромного потока данных можно проверять очень глубокие релятивистские теории, связанные с физикой черных дыр. Эти объекты удивительно напоминают ядра активных галактик и квазары, поэтому возникла счастливая возможность на основе менее длительных исследований микрокваров в нашей Галактике проследить эволюцию и взаимодействия вещества вокруг сверхмассивных ЧД в других галактиках.

Информация

«Юнона» вышла на орбиту Юпитера

4 июля 2016 г. американская АМС «Юнона» («Juno», «Jupiter Polar Orbiter»), стартовавшая 5 августа 2011 г. с мыса Канаверал, вышла на орбиту вокруг Юпитера, преодолев 2,8 млрд км (18,7 а.е.), чтобы исследовать его происхождение и эволюцию (Земля и Вселенная, 2011, № 6, с. 31).

В ноябре 2016 г. намечено включение научной аппаратуры станции. В течение года «Юнона» сделает 33 оборота вокруг планеты, будет наблюдать самые мощные в Солнечной системе полярные сияния и антициклон (Большое Красное Пятно), пролетая над южным и северным полюсами Юпитера. Станция займется изучением атмосферы, гравитационного и магнитного полей, внутреннего строения планеты-гиганта. На ней установлено 9 научных приборов (микроволновый радиометр определит динамику и строение слоев атмосферы, магнитометр и

прибор для регистрации положения относительно магнитного поля, детектор ионов различных элементов в атмосфере, спектрометр и УФ-спектрометр для регистрации полярных сияний). Для защиты от радиации инструменты АМС помещены в титановый корпус. Кроме того, она оснащена трехцветной неподвижной видеокамерой разрешением 3–15 км, и общественность будет иметь возможность выбирать, какие снимки делать с ее помощью.

По плану «Юнона» завершит свою миссию в 2018 г.

Пресс-релиз NASA,
4 июля 2016 г.



Исследование активных ядер галактик

М.Г. МИНГАЛИЕВ,
доктор физико-математических наук
САО РАН, Казанский (Приволжский)
федеральный университет
Ю.В. СОТНИКОВА,
кандидат физико-математических наук
САО РАН

Активные ядра галактик – одни из самых мощных структур во Вселенной. Считается, что источником энергии в них являются сверхмассивные черные дыры, детально исследовать которые пока невозможно методами наземной и космической астрономии. В статье описывается феномен активных ядер галактик, анализируются результаты многоволновых наблюдений, формулируются проблемы исследования.

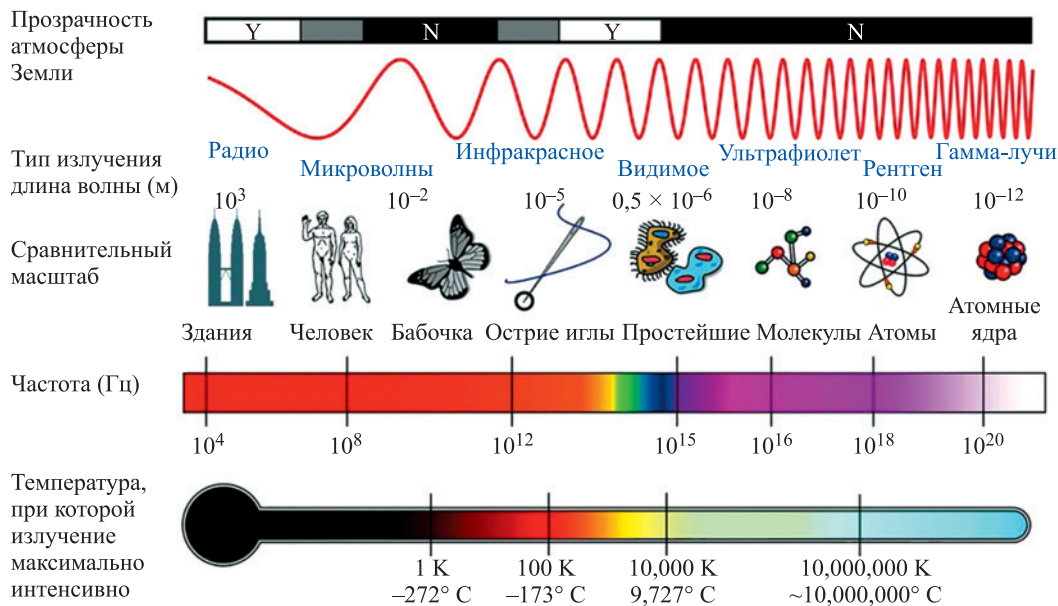


ОСОБЕННОСТИ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

Среди множества разнообразия галактик выделяется особая группа – с активным ядром, скрывающая массивную черную дыру в центре. Она медленно поглощает

газ родительской галактики и при этом светит ярче всех звезд вместе взятых. Часто такие галактики “демонстрируют” массивные “оттоки”, исходящие симметрично относительно своего центра и простирающиеся далеко в межгалактическом

пространстве. В центральной области таких галактик находится массивный компактный объект. Скорее всего, – это черная дыра, которая и является причиной повышенной интенсивности излучения и называется активным ядром. В насто-



Шкала электромагнитных волн. Некоторые представители активных ядер галактик детектируются во всем представленном спектре. NASA.

ящее время таких объектов известно тысячи, обычно их называют активными ядрами галактик (АЯГ): сейфертовские, радиогалактики, лацертиды и квазары (Земля и Вселенная, 1973, № 3; 1978, № 1; 1980, №№ 2 и 5; 1994, №№ 3–5; 2009, № 2; 2010, № 6). Все они очень далекие – в сотнях миллионов световых лет от нас, а, значит, изучая их, можно заглянуть в прошлое нашей Вселенной. Самые экстремальные представители АЯГ называются блазарами, они детектируются во всем диапазоне электромагнитного

спектра, на их примере хорошо описывается “переменное” поведение и исключительная мощность АЯГ.

Звездные системы – галактики размерами в тысячи или сотни тысяч световых лет – как правило, имеют в своих центральных частях компактные сгущения – ядра, в состав которых входят звезды разного класса и газопылевые комплексы в виде гало. Ядро галактики имеет массу порядка несколько миллионов масс Солнца. Наиболее четко они выделяются в спиральных их видах. Некоторые галактики (например, Магеллановы Облака) вообще не имеют ядер. Такая ситуация типична для irregularных галактик с относительно небольшой массой, в которых нет заметной концентрации ве-

щества к центру. У некоторых галактик в ядрах обнаружены мощные области ионизованного газа и горячие звезды. В этих областях, по-видимому, протекают процессы активного звездообразования. Для таких галактик характерны яркие эмиссионные линии в спектрах и мощное непрерывное ультрафиолетовое излучение. Но в отдельных случаях процессы, протекающие в ядрах, не зависят только от свойств звездообразования; таковы галактики с активными ядрами – это около 1% от нормальных галактик. Активные ядра галактик выделяют гигантскую энергию – 10^{39} – 10^{40} Дж/с, генерируя различные виды мощного излучения: рентгеновское, ультрафиолетовое, инфракрасное и радиоизлучение, выбрасывая при

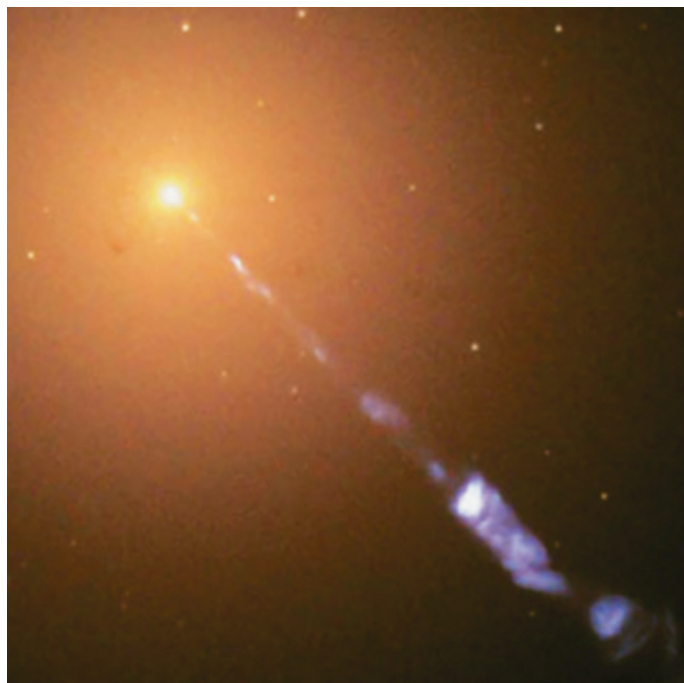
Галактика M87 (NGC 4486) с активным ядром в созвездии Дева. Снимок получен в 2007 г. с помощью Космического телескопа Хаббла. Фото NASA.

этом облака радиоизлучающей плазмы. Это не связано с находящимися в центральных областях АЯГ отдельными звездами и газовой-пылевой комплексами. К основным признакам активности ядер галактик относятся следующие:

- из очень небольшой области размерами с Солнечную систему “выплескивается” поток энергии, сравнимый с излучением ста миллионов или миллиардов звезд, подобных Солнцу;

- излучение переменное, почти всегда без четко определяемого периода (от часов до десятков лет); в результате меняется не вся галактика, а только меньшая ее часть;

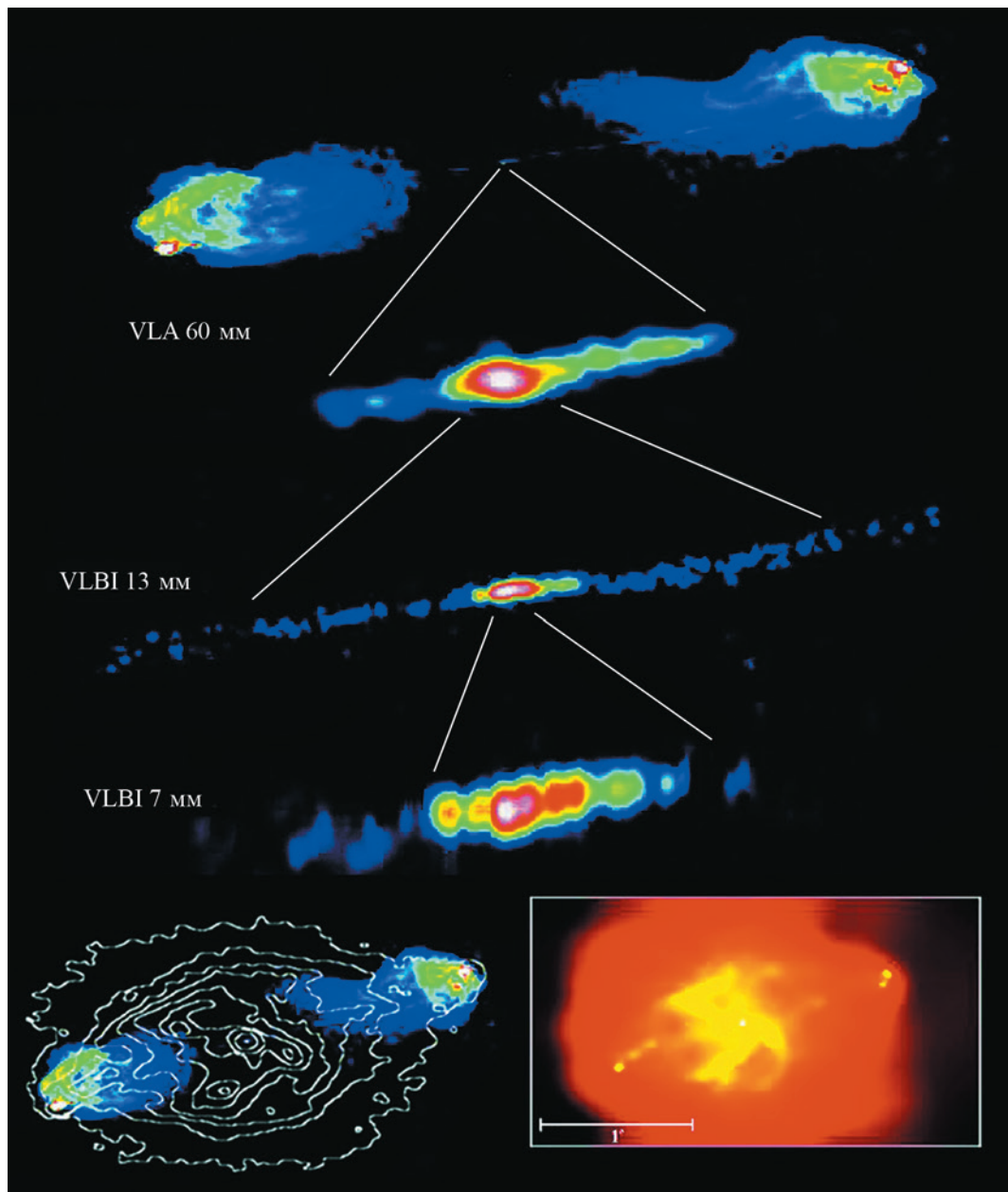
- необычно высокая мощность излучения в различных интервалах длин волн (от радио- до гамма-лучей). Оно локализовано в небольшой области, размером менее светового года; спектр его указывает на нетепловое излучение, порождаемое ускоренно движущимися заряженными частицами.



- наличие узких выбросов плазмы – ионизованного газа и ускоренных релятивистских электронов, исходящих из центра галактики – источников радиоизлучения; многие АЯГ являются радиоисточниками.

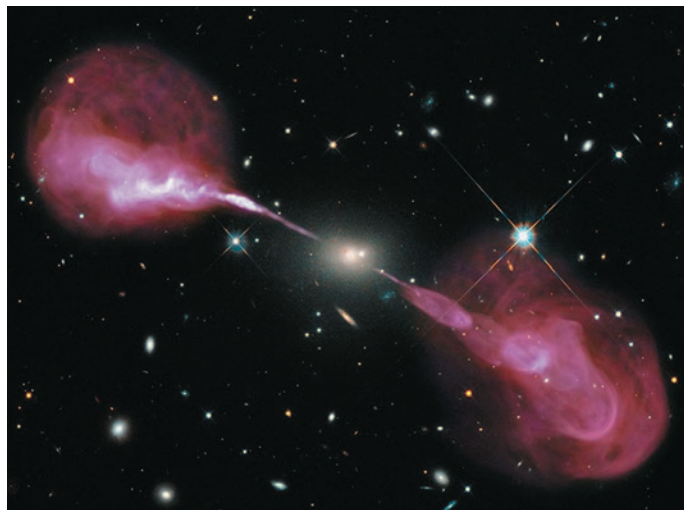
Протяженность выбросов в АЯГ может быть очень велика: например, в галактике M87 (NGC 4486), находящейся в созвездии Дева в 53,5 млн св. лет от нас, он составляет порядка 5 тыс. св. лет. Считается, что в центре M87 находится сверхмассивная черная дыра массой $3,5 \times 10^9 M_{\odot}$, которая и порождает активность ее ядра. Это один из самых тяжелых объектов во Вселенной, известных науке. Вокруг черной дыры вращает-

ся диск ионизованного газа, из которого со скоростью, близкой к скорости света, наблюдается выброс вещества (джет). Диск вокруг черной дыры вращается со скоростью около 1000 км/с. Наблюдения и теоретические исследования показали, что выброс вещества в M87 имеет синхротронную природу (его порождают ускоренно движущиеся электроны). Очевидно, что в ядре M87 происходят какие-то мощные физические процессы, сопровождающиеся выделением огромного количества энергии, в триллион раз превосходящего мощность фотонов видимого света; оно сопоставимо с излучением десятков и даже сотен миллионов звезд.



Радиогалактика Лебедь А (3C405). Вверху – четыре изображения галактики, полученные на радиотелескопах VLA ($\lambda = 60$ мм), VLBI (13 мм) и VLBI (7 мм). От центра галактики тянется синяя нить – это движение ускоренных элементов почти со скоростью света, из ядра исходят узкие джеты и протяженные компоненты с горячими пятнами (горячие области показаны красным). Внизу справа – рентгеновское изображение Лебедь А в условном цвете (2000 г., космическая обсерватория “Чандра”, экспозиция – 9 ч); внизу слева – совмещенные радио- и рентгеновское изображения (1998 г., VLA и VLBI).

Струйный выброс (1,5 млн св. лет каждый) в галактике 3C 348 в созвездии Геркулеса. Изображения получены в 2012 г. в оптическом спектре с помощью Космического телескопа Хаббла и в радиодиапазоне (в условном цвете) с помощью интерферометра VLA (NRAO). Фото NASA.



РАДИОГАЛАКТИКИ

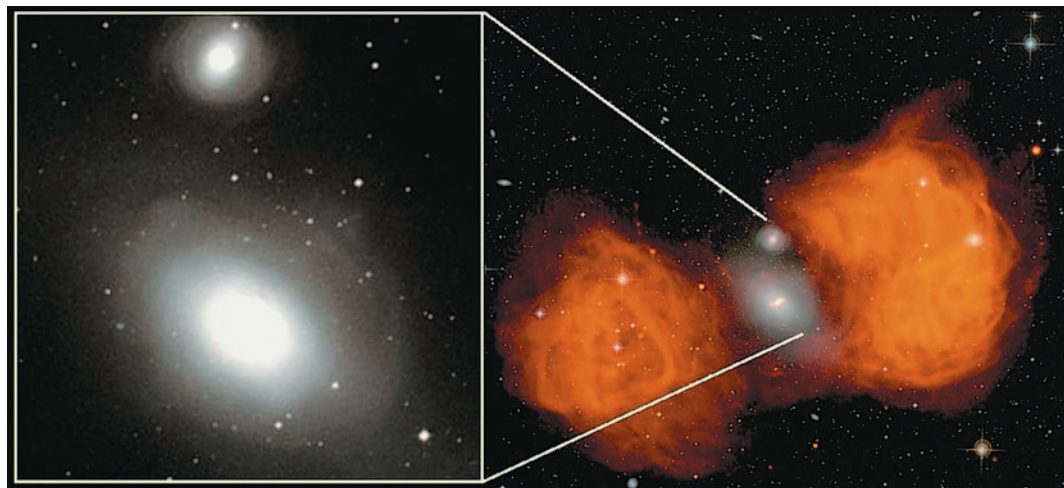
Одним из интересных типов АЯГ являются радиогалактики. В них активность ядра приводит к повышенному радиоизлучению (светимость $\sim 10^{41} - 10^{43}$ Дж/с). Оно доминирует над другими видами излучения и в тысячи раз превосходит по мощности радиоизлучение нормальных галактик — таких как наша. Радиоизлучение радиогалактик связано с выбросом потоков релятивистских электронов из ядра, которое и регистрирует радиотелескоп.

Самая мощная радиогалактика, которая была впервые обнаружена, — Лебедь А; она удалена от нас на расстояние в 600 млн св. лет. Мощность ее радиоизлучения 10^{38} Дж/с, обусловленная активностью ядра, превышает в шесть раз мощность оптического излучения, то есть излучения

всех звезд галактики. Электроны тормозятся межгалактической средой, образуя облака, светящиеся в радиодиапазоне; именно их наблюдают с помощью радиотелескопа на сантиметровых длинах волн. Радиоизлучение Лебедь А настолько сильное, что (несмотря на удаленность) — это самый яркий источник нетеплового излучения на небе. “Горячие пятна” — области, где вещество струй тормозится холодным и плотным окружающим газом. Оптическими методами обнаружено излучение сильноионизованной плазмы в области ядра галактики. Установлено, что галактика вращается вокруг оси, направленной вдоль прямой, соединяющей два ярких компактных компонента.

Еще пример — радиогалактика 3C348 в созвездии Геркулеса. Исходящий из нее струйный выброс — один из

самых ярких внегалактических радиоисточников. Компактный миллиардсекундных угловых размеров источник джета совпадает с галактическим ядром. Часть радиоизлучения происходит непосредственно из хорошо сфокусированных струй (они практически не заметны). Основная часть нетеплового излучения исходит от широких лепестков, так как в этом месте ускоренно движущиеся потоки вещества резко тормозятся межгалактической средой. Детальный анализ наблюдений показал, что черная дыра в центре 3C 348 в 1000 раз массивнее черной дыры в центре нашей Галактики ($2,5 \times 10^9 M_{\odot}$). Внешняя часть выбросов “формирует” необычные кольцевые структуры, которые “намекают” на то, что в истории сверхмассивной черной дыры было всего несколько огромных вспышек,



которые могут быть как-то связаны с поглощением сверхмассивной черной дырой материи довольно массивных объектов.

Другой пример АЯГ – гигантская эллиптическая галактика NGC 1316 размером около 60 тыс. св. лет в созвездии Печи (около 62 млн св. лет от нас). Считается, что около 3 млрд лет назад она поглотила спиральную галактику и около 100 млн лет назад начала “съедать” соседнюю, меньшую по размерам спиральную галактику NGC 1317.

Исследование АЯГ интересно тем, что они “предлагают” нам уникальную лабораторию вне Земли для изучения сильных и крупномасштабных магнитных полей в окрестностях черной дыры. Радиоастрономические исследования структуры и переменности АЯГ невозможно пе-

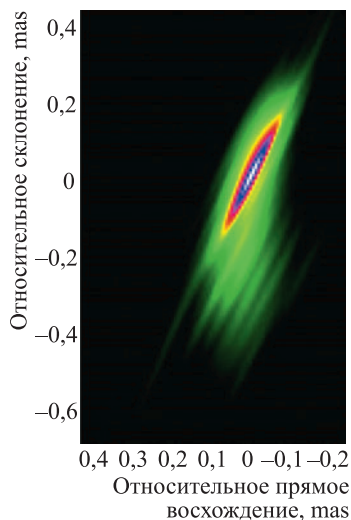
реоценить, так как именно методы, применяемые в работе на радиоинтерферометре со сверхдлинной базой (РСДБ) позволяют достичь углового разрешения в десятки микросекунд, а запуск космических обсерваторий с радиотелескопами – качественно улучшить угловое разрешение. Например, российская космическая обсерватория “Радиоастрон” получила изображение сильно переменного внегалактического АЯГ BL Lacertae в радиодиапазоне на частоте 22 ГГц с участием радиотелескопа KRT-10 совместно с 15 наземными телескопами. BL Lacertae – типичный представитель блазаров, известных как лацертиды. Изображение столь предельно высокого разрешения (соответствует 21 миллиардсекунде) позволяет “заглянуть” в космический “очаг” с такой энергией, которую мож-

Радиогалактика NGC 1316 в созвездии Печи (во врезке слева – снимок в оптике). Изображение синтезировано из снимков в видимом и радиодиапазоне, полученных системой апертурного синтеза VLA и Космической обсерваторией Хаббла. Фото NRAO/AUI, Дж.М. Усон.

но достичь при нагревании материи на более, чем триллион градусов (такое угловое разрешение позволяет “заглянуть” в очень компактные области АЯГ, близко к центру ядра).

БЛАЗАРЫ И КВАЗАРЫ

Квazarы – интенсивные источники космического радиоизлучения, расстояния до которых оцениваются в миллиарды световых лет, представляющие собой активные ядра далеких галактик; отличаются



Блазар BL Lacertae в созвездии Ящерицы. Изображение получено в 2013 г. космической обсерваторией “Радио-астрон” в радиодиапазоне на частоте 22 ГГц совместно с 15-ю наземными телескопами. По данным Х. Гомез и др., 2015 г.

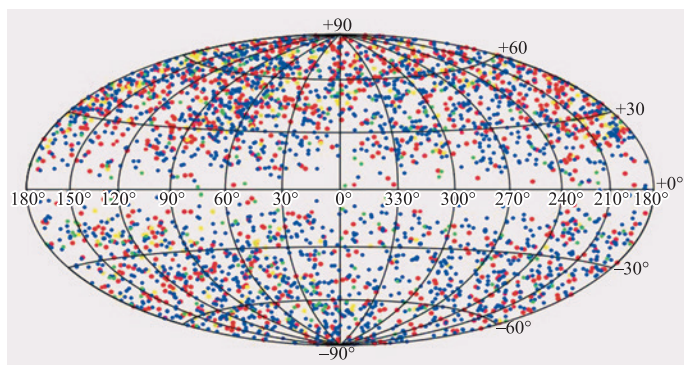
малыми угловыми размерами, из-за чего долгое время считались галактическими звездными объектами. Сверхмассивные активные черные дыры внутри квазаров окруже-

ны гигантскими кольцами газа и пыли, они в огромных количествах поглощают окружающую их материю.

Блазары – родственники квазаров. Это “экстремальные” представители АЯГ; они, в отличие от радиогалактик, непрерывно излучают во всем диапазоне спектра и характеризуются большими магнитными полями (от 10^3 Гс и выше). Из-за близости джета к лучу зрения наблюдателя излучение является релятивистски усиленным: возникает такой эффект усиления излучения из-за скоростей, близких к скорости света. В результате в общей доле светимости доминирует усиленное излучение джета. Если бы человеческий глаз мог видеть радиоволны, то блазары и квазары были бы одними из ярких объектов на небе (несмотря на их удаленность), и небо никогда бы не выглядело одинаково днём и ночью подряд из-за событий, происходящих в их центральных областях. Блазары и квазары невидимы для нас в силу своей удаленности (десятки и сотни миллионов световых лет); но в радио-, рентгеновских и в гамма-лучах это – “основной тип населения”. Прототип блазара (от него они получили свое название) – переменный объект BL Lacertae в созвездии Ящерицы (расстояние 900 млн св. лет), открытый в 1929 г. немецким астрономом К. Хофмейстером и 40 лет назад отнесенный к внегалактическим. Размер излучающей области – 10^{12} км, масса объекта – 10^8 – $10^9 M_{\odot}$. В 1990-х гг. были известны сотни блазаров, в 2009 г. на основе анализа был составлен их обширный каталог – Roma-BZCAT (Э. Массаро). В настоящее время в этот каталог входит 3561 блазар.

Блазары являются наиболее интересным подклассом АЯГ, поскольку джет в них направлен под малым углом к лучу зрения наблюдателя и его излучение доминирует во всем диапазоне: от радиоволн до гамма-

Карта расположения всех известных блазаров каталога Roma-BZCAT (Э. Массаро, 2009) на небесной сфере. Общее число блазаров в каталоге – 3561. Синие и красные точки соответствуют FSRQ-блазарам и лацертидам. Официальный сайт каталога Roma-BZCAT.



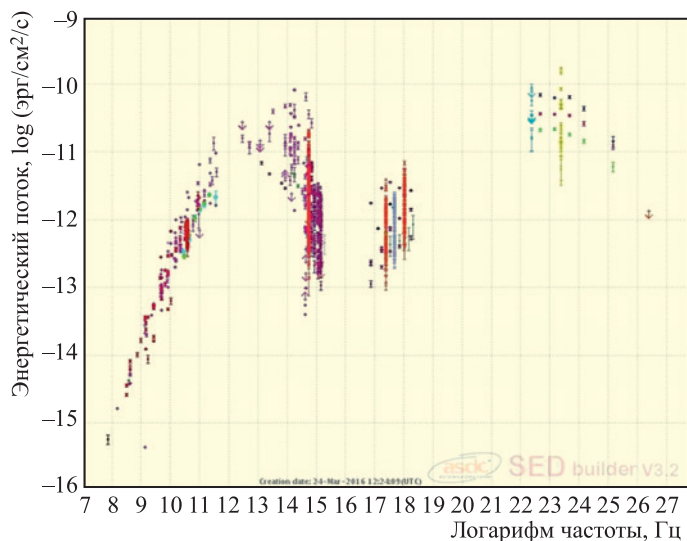


Диаграмма характерного спектрального распределения энергии блазара АО0238 + 16. На ней отчетливо видны два максимума излучения — значит в объекте генерируется высокоэнергетическое излучение в рентгеновском и гамма-диапазонах. Наличие второго максимума характерно для блазаров. Например, обычные галактики не детектируются на высоких частотах, так как не излучают на них; в их центральных областях не происходят активные процессы мощного энерговыделения. Получена с использованием сервера ASDC SED.

энергий. Они образуют самый многочисленный класс объектов, отождествленный с источниками гамма-излучения. Например, более половины дискретных источников, вошедших в каталог, суммирующий наблюдательные данные космической гамма-обсерватории “Ферми” (Земля и Вселенная, 2015, № 3) — это блазары. В настоящее время их уже более 1700 (число блазаров в каталоге “Ферми”), здесь их меньше количества всех известных блазаров в каталоге Roma-BZCAT. Это связано с тем, что в гамма-диапазоне они не все детектируются. Переменность блеска блазаров наблюдается во всем диапазоне электромагнитного спектра и на различных временных масштабах. Кроме того, наблюдается высокая и переменная поляризация излучения.

Блазары обладают односторонними радиоджетами, в которых наблюдаются видимые сверхсветовые движения плазмы. Движение плазмы в джете с околосветовыми скоростями приводит к релятивистскому усилению его излучения в несколько раз, что делает блазары источниками с наиболее выраженной активностью среди всех типов АЯГ. В общей доле светимости блазаров доминирует усиленное излучение джета. В спектральном распределении энергии хорошо выделяются два пика: в микроволновом и гамма-диапазонах, что не всегда наблюдается для обычных радиогалактик. Считается, что за такое распределение ответственны два основных механизма: синхротронное излучение и обратное комптоновское рассеяние.

МОДЕЛЬ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

За основную модель активных ядер галактик принята унифицированная схема, которая объясняет все наблюдаемое разнообразие активных галактических ядер под тем углом, под каким наблюдатель видит джет. Согласно этой схеме, в центре АЯГ находится сверхмассивная черная дыра, окруженная аккреционным диском. Сами черные дыры не излучают света, но падающее на них вещество образует горячий замагниченный аккреционный газовый диск, вращающийся со скоростью, близкой к скорости света и являющийся основным источником энергии ядра. Аккреционный диск непрерывно пополняется за счет новых порций вещества; это порции межзвездного газа,

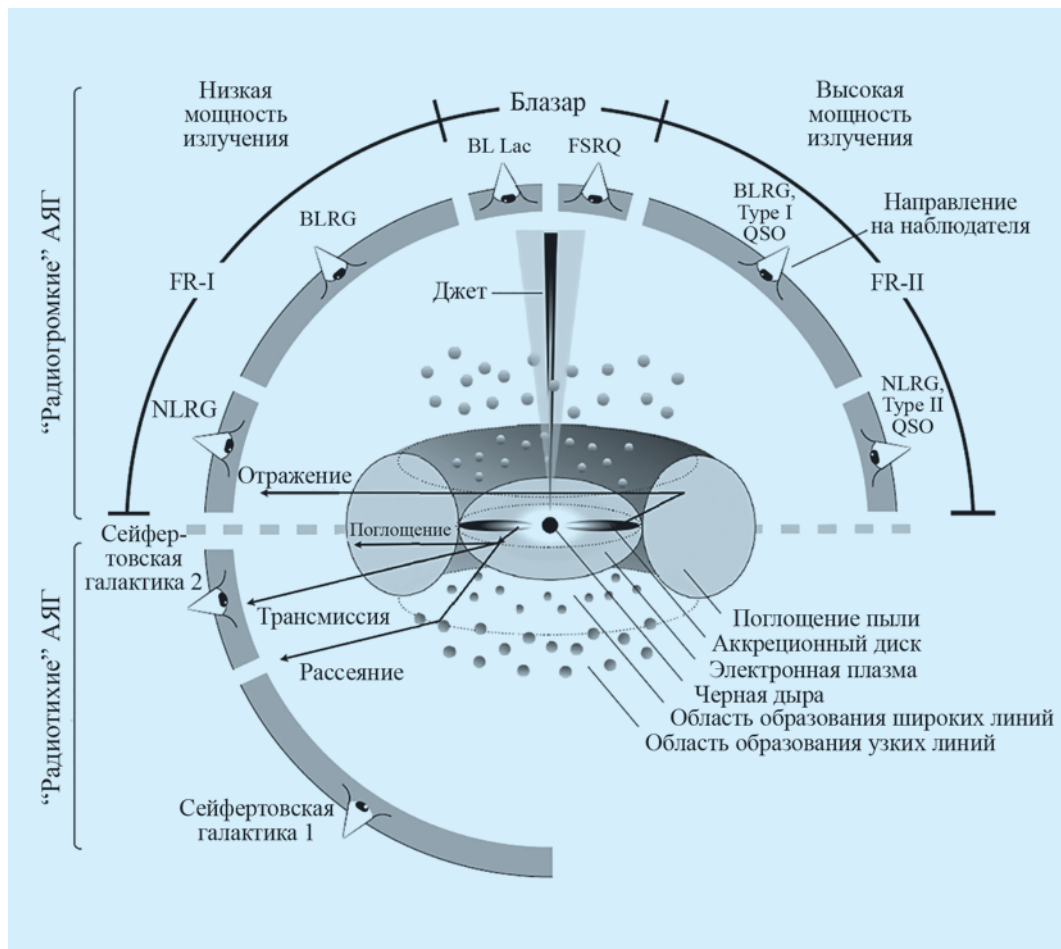
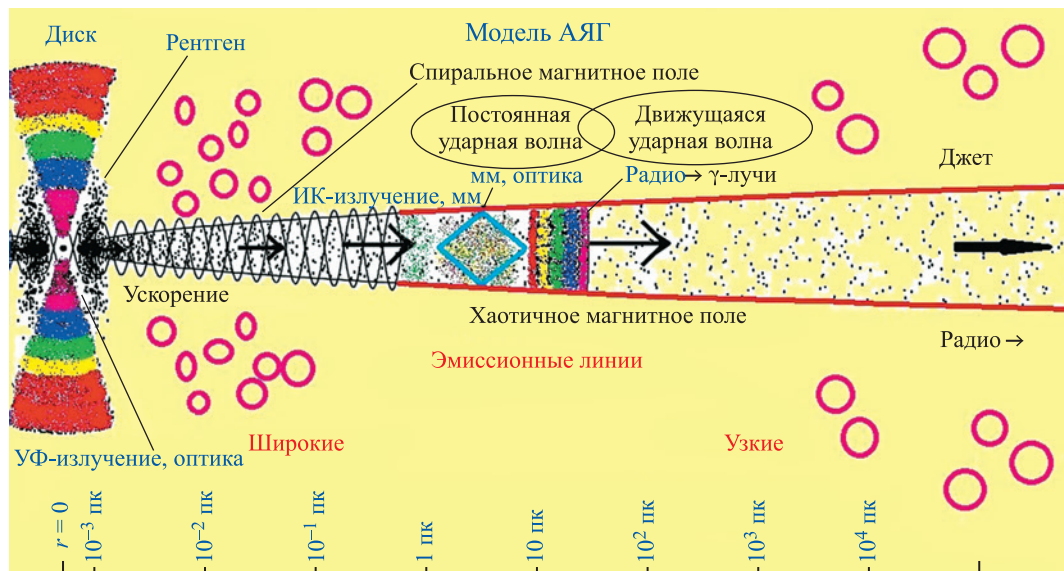


Схема строения центральной части активного ядра галактики и ее основных компонентов, согласно унифицированной модели М. Урри и П. Падовани (1995). Отмечены лацертиды, квазары с плоским спектром, область образования широких линий, область образования узких линий, сейфертовские галактики первого и второго типа, галактики Фанаров–Райли первого и второго типа; квазары с широкими и узкими линиями и квазары с узкими и слабыми узкими линиями. Серые кружки – области образования широких и узких эмиссионных линий. “Глаза” означают направление на наблюдателя. По данным У. Бекманна и К. Шрадера (2012).

попавшие в окрестности черной дыры, – газа, сброшенного звездами в ходе их эволюции или в результате столкновений. Кинетическая энергия падающего вещества, сообщенная ему гравитационным полем черной дыры, обладает вращательным

моментом и в десятки раз превосходит энергию термоядерных реакций. Джеты ультрарелятивистской плазмы выбрасываются из ядра перпендикулярно к плоскости диска. Они получили свое название из-за того, что могут перемещаться со скоро-

стью, близкой к скорости света, и это делает их самыми быстрыми астрономическими объектами. Два высокоскоростных джета из разогретой плазмы вылетают из черной дыры в противоположных направлениях и способны простираться



в космическое пространство на тысячи световых лет, а горячее вещество в них является источником радиоволн.

На субпарсековых расстояниях от центра располагаются плотные облака газа — зоны образования широких эмиссионных линий BLR (Broad line region — область образования широких линий). Узкие эмиссионные линии возникают в более разреженных зонах NLR (Narrow line region — область образования узких линий), находящихся на расстоянии сотен парсек от черной дыры. С внешней стороны аккреционно-го диска возникает молекулярный тор, содержащий пыль и вносящий значительный вклад в ИК-излучение многих АЯГ.

Некоторые наблюдательные характеристики могут быть объяснены

присутствием газопылевого тора, закрывающего собой центральную часть галактики. Внутренняя часть тора, взаимодействуя с непрерывным излучением АЯГ, частично ионизируется и образует BLR. Когда за джетом АЯГ ведется наблюдение под большим углом, как бы со стороны, то газопылевой тор скрывает центральную часть и область образования широких линий. В этом случае в спектре обнаруживаются только узкие линии (Сейфертовские галактики второго типа). Джеты АЯГ, расположенные под небольшим углом к наблюдателю, излучают широкие линии в спектре и обычно такие объекты классифицируются как радиотихие квазары (Сейфертовские галактики первого типа). Сейфертовские галактики были открыты в 1943 г.

Схематическое представление различных областей излучения в АЯГ (А. Маршер и др., 2009). Внизу — шкала расстояний (в парсеках) от центра объекта (1 пк = 3,26 св. года); вдоль линии распространения джета указаны области формирования разных видов излучения и виды магнитного поля. Красными кружками схематически представлена плотная газовая среда, зелеными — более разреженная (в этих местах формируются широкие и узкие эмиссионные линии соответственно).

американским астрономом К. Сейфертом, они подразделяются на два типа (в соответствии со скоростью движения газа), имеют яркие и широкие эмиссионные линии в излучении ядра, часто относятся к спиральным галактикам. Если джет виден под углом меньше

10°, то нетепловое и релятивистски усиленное излучение доминирует; такой объект относится к блазарам.

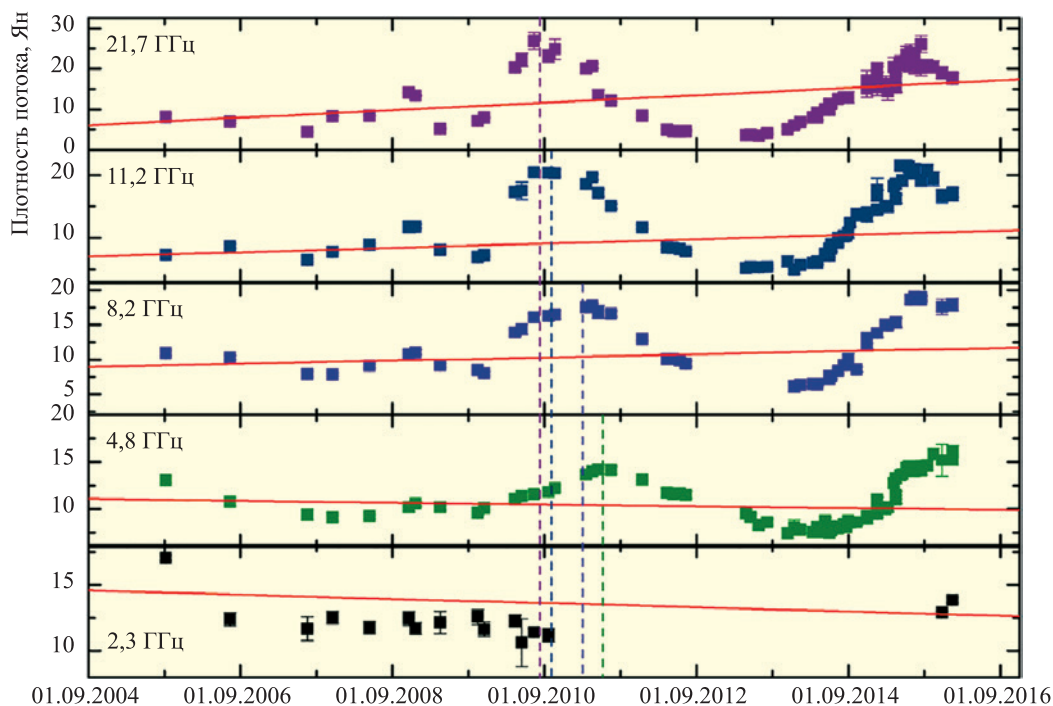
ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК НА РАТАН-600

Радиотелескоп РАТАН-600 – крупнейший в мире радиотелескоп с антенной переменного профи-

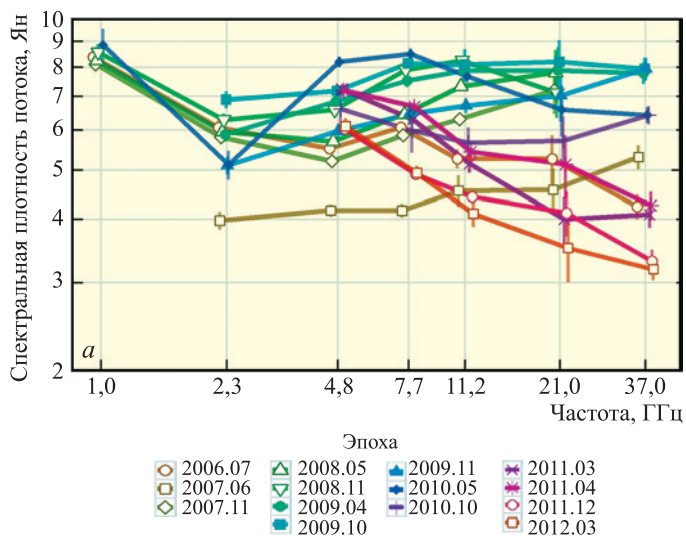
ля и основной в России, работающий в “окне прозрачности” земной атмосферы. Благодаря большим геометрическим размерам РАТАН-600 имеет большое угловое разрешение, которое составляет 2' (при использовании всего кольца). Большая безабберационная зона телескопа позволяет измерять почти мгновенно радиоспектры космических источников в широком диапазоне частот (от 1 до 30 ГГц), что актуально при исследовании переменных радиоисточников. Высокую чувствительность по спектральной плотности потока (количество энергии в единичном интервале частот,

протекающей через единичную площадку в единицу времени; единица измерения – Янский) обеспечивает собирающая поверхность антенны площадью в тысячи квадратных метров. Многие годы радиотелескоп РАТАН-600 выполняет одну из своих проектных задач – мониторинг космических радиоисточников. Благодаря возможности массовых наблюдений исследуются до 200 объектов в сутки на 4–6 частотах одновременно, что невозможно выполнить на других радиотелескопах мира. Сюда входят как авторские программы наземного мониторинга АЯГ, так и совместные международные

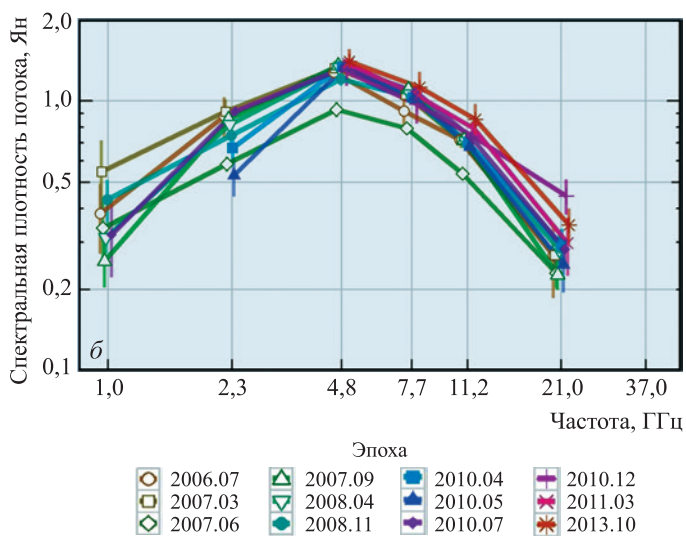
Графики кривых “блеска” для одного из самых переменных блазаров – 3C454.3, полученных в 2005–2016 гг. с помощью радиотелескопа РАТАН-600, САО РАН. Такие кривые позволяют анализировать активные процессы в объекте сразу на нескольких частотах.



Годы



Графики эволюции за 6–7 лет наблюдений синхротронных радиоспектров блазаров: а – 2225–04 (3C446) и б – 0111 + 39 (S40108 + 388). На одном и том же масштабе времени один из блазаров (а) “демонстрирует” значительные вариации радиоизлучения – более, чем в два раза, – на высоких частотах; тогда как второй (б) остается в неизменном состоянии. Данные получены одновременно на РАТАН-600 и обсерваторией Метсахови (Финляндия; частота – 37 ГГц).



Например, авторы проводили мониторинг сильно переменного блазара 3C454.3 (2253 + 16) с использованием двух комплексов радиометров на РАТАН-600. Это самый далекий объект во Вселенной, который можно визуально изучать с помощью любительского телескопа (немного северо-западнее яркой звезды – альфа Пегаса). Плотность потока плавно растет, начиная с 2013 г., и в августе 2015 г. достигает значения почти 23 Ян на частоте 21,7 ГГц. Ранее, в 2010 г., зафиксировано увеличение плотности потока до 27 Ян на частоте 21,7 ГГц; через два месяца максимум (около 20 Ян) наблюдался на частоте 11,2 ГГц и только через полгода – на более низких частотах (7,7 и 4,8 ГГц, 18 и 14 Ян соответственно). В настоящее время зафиксирован спад радиоизлучения. Изменения

программы по поддержке космических обсерваторий (“Планк”, “Радиоастрон”), или совместные программы с зарубежными обсерваториями (Грин Бэнк и VLBA, США; Метсахови, Финляндия). Получаемые на нескольких инструментах данные ценны тем, что представляют одновременные измерения АЯГ в различных диапазонах электромаг-

нитного спектра, что (при переменности самих объектов) наиболее оптимально при исследовании механизмов генерации излучения в них. Главное преимущество измерений на РАТАН-600 – ежедневное получение мгновенного радиоспектра, а также возможность детально проследивать его эволюцию.

на четырех длинах волн коррелируют: увеличение и уменьшение потока происходит на всех частотах с определенной задержкой и снижением амплитуды в сторону длинных волн. Такая картина переменности нетеплового излучения характерна для АЯГ.

Как показывают многолетние измерения, некоторые блазары могут находиться в одном состоянии (между вспышечной активностью) 10 лет и более. Другая часть блазаров “демонстрирует” переменность в течение более коротких промежутков времени (дни, недели, месяцы). Почему так происходит? Скорее всего, это зависит от условий окружающей черную дыру среды, ее массы, плотности и других индивидуальных особенностей.

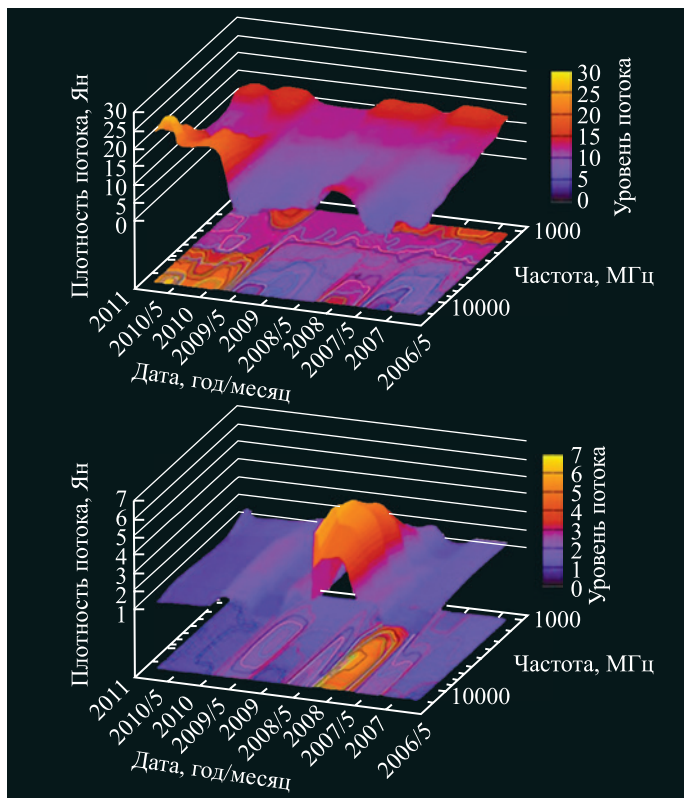
С 2006 г. группой сотрудников САО РАН под руководством М.Г. Мингалиева на радиотелескопе РТАН-600 систематически проводится мониторинг более тысячи блазаров. Результаты в виде широкодиапазонных радиоспектров и измеренных плотностей потоков размещаются на домашней странице обсерватории в интерактивном каталоге BLcat (www.sao.ru/blcat/). Каталог может использоваться как инструмент для оценки некоторых спектров и параметров переменности блазаров

на частотах РТАН-600. Особенность этого каталога в том, что в него занесены не только яркие объекты, но и довольно слабые (их спектральная плотность потока меньше 50 мЯн на радиочастотах). Такие источники редко исследуются систематически. Измерения АЯГ на РТАН-600 позволяют наблюдать частотно-временную эволюцию радиоизлучения блазаров. Изменение спектральной плотности потока на нескольких частотах в течение длительных промежутков времени позволяют отслеживать вспышечные события в АЯГ, оценивать их периоды.

Массовое исследование блазаров на радиочастотах позволило сделать ряд выводов о взаимосвязи излучения в разных областях АЯГ. По результатам одновременных наблюдательных данных на РТАН-600 и на гамма-телескопе LAT космической обсерватории “Ферми” была подтверждена тесная взаимосвязь гамма- и радиоизлучений, взаимосвязь излучения в джете и в аккреционном диске, и история их образования из одной популяции фотонов: например, джет образуется вблизи центральной черной дыры, усиливаясь за счет ее вращения, или это происходит из аккреционного диска. В то же время часть энергии аккреци-

онного диска переизлучается в область образования широких линий. Связь между источниками этих излучений до конца не исследована. Однако в современных моделях подразумевается существование связи между светимостью в джете и темпом аккреции вещества на центральную черную дыру. Эффективным методом исследования этой связи является изучение соотношения светимостей в различных областях образования излучения. Изучение множества блазаров позволяет рассчитать статистические корреляции между светимостями разных порядков.

Кооперация с другими телескопами – одна из настоящих задач РТАН-600. Это предполагает наблюдения одних и тех же космических источников на нескольких инструментах одновременно. Что это дает? Допустим, объект имеет короткую переменность излучения – дни или недели. Если необходимо узнать форму его спектра во всем диапазоне электромагнитной шкалы, то измерения должны быть сделаны как можно в более короткий промежуток времени. Такая тактика наблюдений используется во всем мире. Например, в 2009–2011 гг. в результате одновременных наблюдений на частоте 30–857 ГГц с помощью космических обсер-



Частотно-временная эволюция спектральной плотности потока блазаров 3C454.3 (вверху) и АО0235 + 16. Объемные изображения получены в 2006–2011 гг. с использованием радиотелескопа РАТАН-600. Изображение позволяет анализировать вспыхивающие процессы в объекте одновременно и по годам, и по частотам.

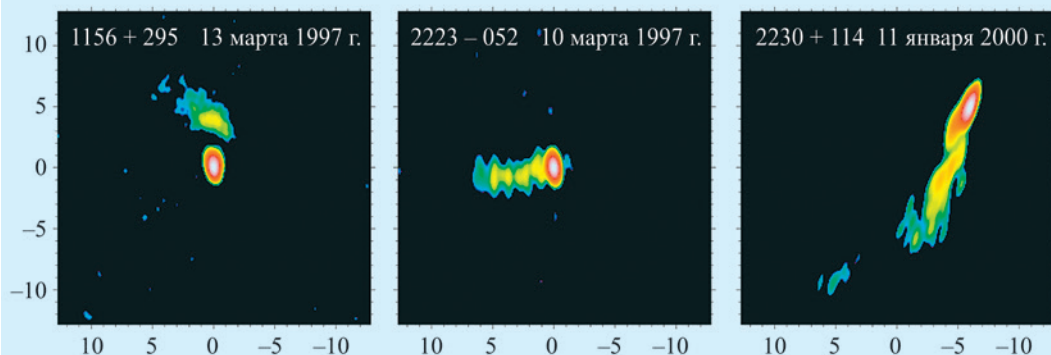
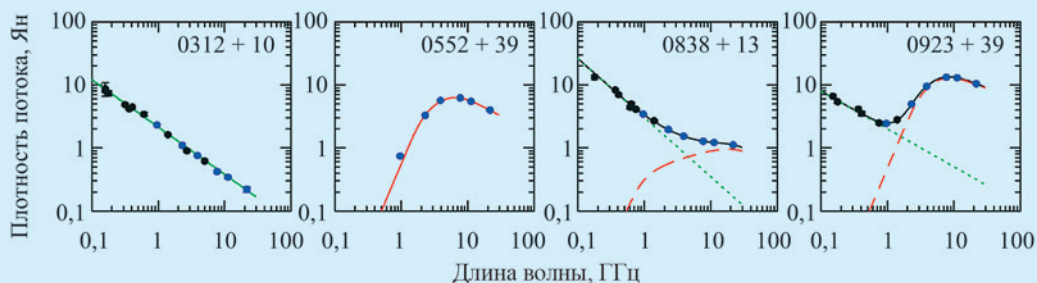
ваторий “Ферми”, “Планк” (Земля и Вселенная, 2014, № 1), “Свифт” (Земля и Вселенная, 2005, № 2, с. 68–69) и ряда наземных телескопов получены одновременные экспериментальные кривые распределения энергии в спектре для 105 блазаров. “Вклад” в низкочастотную часть (1–22 ГГц) таких кривых принадлежит РАТАН-600. В результате с высокой точностью определены оценки параметров различных компонент излучения для разных типов блазаров.

В результате многолетней программы по исследованию центральных

областей ядер активных галактик, проводимой научными сотрудниками Астрокосмического центра ФИАН (АКЦ ФИАН) под руководством доктора физико-математических наук Ю.А. Ковалёва, зарегистрировано несколько тысяч мгновенных радиоспектров АЯГ. Анализ их эволюции дал основания полагать, что источник нетеплового излучения АЯГ представляет собой непрерывную струю релятивистских частиц, движущихся от центрального ядра к периферии в продольном магнитном поле. Изменение потока таких частиц от ядра че-

рез основание струи и порождает наблюдаемую переменность излучения источника. Все полученные спектры переменных источников качественно и почти всегда количественно могут описываться в рамках двухкомпонентной схемы – переменного излучения релятивистской струи (на высоких частотах) и постоянного излучения периферийного компонента (“расширившейся” части струи). В зависимости от “вклада” каждого из них формируется радиоспектр: если он “плоский” – то плотность потока не меняется с ростом частоты, доминирует излучение компактного компонента (основание струи); если он падающий – доминирует излучение внешнего протяженного компонента; представлены и случаи равнозначного “вклада” двух компонентов (более сложная форма спектра).

В результате массовых кооперативных исследований мгновенных спектров и миллисекундной



Модельные радиоспектры и VLBA-изображения струйного выброса АЯГ, наблюдавшихся на РАТАН-600. Вверху – радиоспектры, полученные моделированием (АКЦ ФИАН и САО РАН, Ю. Ковалёв и др., 2002, 2004) излучения компактной релятивистской струи в одно- и двухкомпонентных спектрах: кривые красного цвета – модель; синие точки – спектры, полученные на РАТАН-600. Внизу – радиоизображения АЯГ в условном цвете, полученные на частоте 15 ГГц в VLBA (NRAO, США, К. Келлерман, 2004).

угловой структуры АЯГ сделаны некоторые выводы. Природа переменного компонента спектров (РАТАН-600) и изображения яркости миллисекундных компонентов (VLBA, США) внегалактических объектов – едина и отражает физику релятивистских струй из активного ядра. Амплитуда переменного компонента радиоспектров близка к суммарной (VLBA) яркости струи на соответствующей частоте и может использоваться для взаимных “привязок” инструментов.

БЫСТРАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ

Переменность АЯГ (квазары, лацертиды, радиогалактики) – от суток до нескольких лет – исследуется на телескопе РАТАН-600 совместно сотрудниками ГАИШ МГУ и САО РАН. Начиная с 1999 г. наблюдаются все источники с плотностями потоков выше принятого, находящиеся в определенной области неба. Параметры вспышечных процессов оцениваются общепринятыми в астрономии методами. В результате по-

лучены характеристики излучающих областей радиоисточников – такие, как временные задержки вспышек между частотами, периоды активности, “яркостные” температуры, спектры переменной компоненты. Используя найденные параметры для космических источников, находящихся на разных расстояниях от нас, можно исследовать их эволюцию. Объекты с большими красными смещениями образовались миллионы лет назад, поэтому наблюдатель одновременно видит источники, сформировавшиеся на разных стадиях эволюции. Не имея возможности проследить эволюцию космического объекта, но имея ряд однотипных источников, находящихся на разных этапах эволюции, можно установить свойства излучающей области (в зависимости от окружающей среды).

Для обнаружения и исследования переменности АЯГ в течение короткого времени наблюдения на РАТАН-600 проводятся ежедневно в течение 3–3,5 месяцев. Подобные работы нигде в мире не проводятся. Для анализа быстрой переменности космического объекта используются как стандартные алгоритмы, так и методики, самостоятельно разработанные сотрудниками САО РАН. В отличие от долговременной переменности

(следствие процессов, происходящих внутри радиоисточников) короткая переменность может быть вызвана в самом источнике, в межзвездной и межгалактической среде (когда на пути излучения встречается неоднородная среда). Выделено несколько видов короткой переменности: периодический процесс; процесс, где в пределах сета есть только один процесс, в котором выделяется только одно активное событие; сумма двух или более циклических процессов с разными амплитудами и характерными временами; случайные процессы (например, отдельные вспышки).

В настоящее время не так много обсерваторий, в которых систематически проводятся мониторинги АЯГ: более 35 лет с помощью 13,5-м антенны Обсерватории Метсахови (Финляндия) на частоте 22 и 37 ГГц; с помощью 26-м антенны Радиоастрономической обсерватории Университета Мичигана (США) на частотах 4,8, 8 и 15 ГГц; с помощью 40-м антенны Обсерватории Оуэнс Валли (США) на частоте 15 ГГц. С 2008 г. дважды в неделю наблюдаются порядка 1700 АЯГ по программе наземной поддержки исследований в космической обсерватории “Ферми”. Возможность долговременного массового мониторинга на РАТАН-600 представ-

ляется значимым преимуществом этого инструмента при анализе квазисовременных кривых “блеска” плотностей потока радиоизлучения на нескольких частотах. В этом случае мы можем видеть, как меняется радиоизлучение АЯГ в разных диапазонах.

Феномен АЯГ ставит перед исследователями еще больше вопросов. Наблюдения частично подтверждают существующую теорию, однако даже космические интерферометры не могут достичь углового разрешения, способного детально картографировать центральную часть АЯГ – ядро. Исследования в диапазонах (от радио- до гамма) могут дать косвенные оценки размеров и структуры излучающих областей. Физический механизм изменения потока окончательно не выяснен: недостаточно изучено строение источников выделения энергии в АЯГ, не полностью установлена взаимосвязь между механизмами излучения в разных диапазонах длин волн. Частично причина заключается в сложности проведения длительных экспериментов. Актуальным остается проведение эксперимента с привлечением большого числа инструментов для реализации наблюдений АЯГ во всем диапазоне электромагнитного спектра.



Исследования атмосферы Солнца

В.М. БОГОД,
доктор физико-математических наук
САО РАН

В настоящее время радиотелескоп РАТАН-600 активно используется, он обладает высоким пространственным разрешением и высокой чувствительностью по яркостной температуре, низким уровнем инструментальной поляризации, большим динамическим диапазоном и многократным (многочастот-



ным) перекрытием диапазона рабочих частот.

В статье делается попытка обобщить результаты исследования радиоизлучения Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 за период с 2006 по 2016 гг. для демонстрации значимости этого направления на мировом уровне.

ИЗУЧЕНИЕ СОЛНЦА В РАДИОДИАПАЗОНЕ

Солнечная атмосфера сейчас активно исследуется космическими обсерваториями “SOHO”, “TRACE”, “RHESSI”, “CORONAS”, “GOES”, “SDO”, “STEREO-A и -B” (Земля и Вселенная, 2003, № 3; 2007, № 2; 2010, № 6; 2013, №№ 3 и 5). Они работают в диапазонах волн, которые не пропускает земная атмосфера – главным обра-

зом в линиях ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов. Однако измерения корональных магнитных полей в этих диапазонах очень сложные и часто невозможны из-за высоких температур в короне Солнца, достигающей миллионов градусов. Наблюдения в микроволновом диапазоне значительно дополняют эти исследования, обеспечивая прямую, недублируемую информацию о параметрах плаз-

мы в верхней хромосфере нижней короны и в переходном слое между ними. В области физических исследований атмосферы Солнца (его радиоизлучения) на РАТАН-600 получены результаты, многие из которых до сих пор не доступны другим радиоастрономическим инструментам. Это в значительной мере относится к высокоточным измерениям круговой поляризации излучения пространственных струк-



Перископическое зеркало на Южном секторе радиотелескопа РАТАН-600, состоящее из 124 отражательных элементов высотой 8,5 м и шириной 3,1 м каждое. Перископ протяженностью 400 м управляется по углу высоты и обозревает южную часть неба в диапазоне азимутальных углов – от + 30° до –30°.

тур различных размеров и контрастов в широком интервале частот. Например, на первых же слабоконтрастных изображениях РАТАН-600 была обнаружена грануляционная структура на диске Солнца в сантиметровом диапазоне радиоволн, которая в дальнейшем была подтверждена и в наблюдениях на других радиотелескопах.

Спектрально-поляризационные наблюдения на РАТАН-600 позволили разработать методы диагностики и измерения корональных магнитных полей. Несмотря на пионерский характер этих работ, их уровень до настоящего времени не достигнут на других инструментах. Это происходит потому, что специализированные инструменты (радиогелиографы) основаны на интерферометрических принципах, в связи с чем выполняемые на

них наблюдения не были спектральными и не имели необходимую чувствительность по поверхностной яркости.

Строящиеся новые радиогелиографы “CSRP” (Китай) и “ССРТ” (Россия) должны быть спектральными инструментами, они смогут решать многие задачи по спектрам вспышечных событий.

Следующим фактором, который выделяет РАТАН-600 из других инструментов в мире, используемых для солнечных исследований, является перекрытие широкого диапазона частот (0,75–18,2 ГГц) непрерывно, с частотным разрешением 1% на 112 отдельных частотных каналах. При этом на каждой частоте отдельно регистрируются правая и левая круговые поляризации радиоизлучения от отдельного радиоисточника на диске Солнца.

Сочетание высокой чувствительности, высокого частотного разрешения и точных измерений поляризации делает эти измерения уникальными.

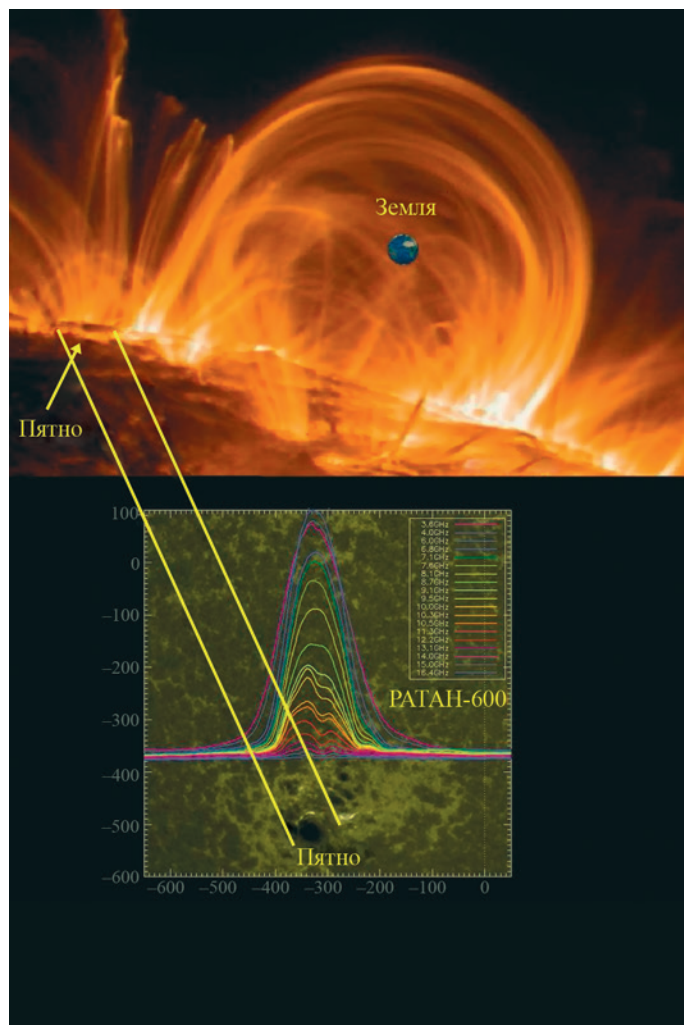
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

29 марта 2006 г. произошло полное затмение Солнца, которое наблюдалось на площадке крупного радиотелескопа РАТАН-600 с помощью широкодиапазонного приемного комплекса. Обычно такое явление наблюдают с помощью небольших радиотелескопов и относительно простых радиополяриметров, доставляемых в разные пункты Земли; при этом используется высокое пространственное разрешение благодаря дифракции радиоизлучения на лимбе лунного диска. В результате наблюдений этого затме-

Активная область на диске Солнца (диск Земли наложен для сравнения размеров). Вверху – участок солнечной атмосферы в рентгеновских лучах по данным космической солнечной обсерватории “TRACE”. Фото NASA. Внизу – изображение активной области в линии 1600 Å, возникшей 21 октября 2014 г., по данным космической солнечной обсерватории “SDO”. На него нанесены сканы, полученные на РАТАН-600 на частотах 3,6–16,4 ГГц. САО РАН.

ния была реализована большая эффективная площадь крупного радиотелескопа и его мощные аппаратные возможности по анализу интенсивности и поляризации радиоизлучения.

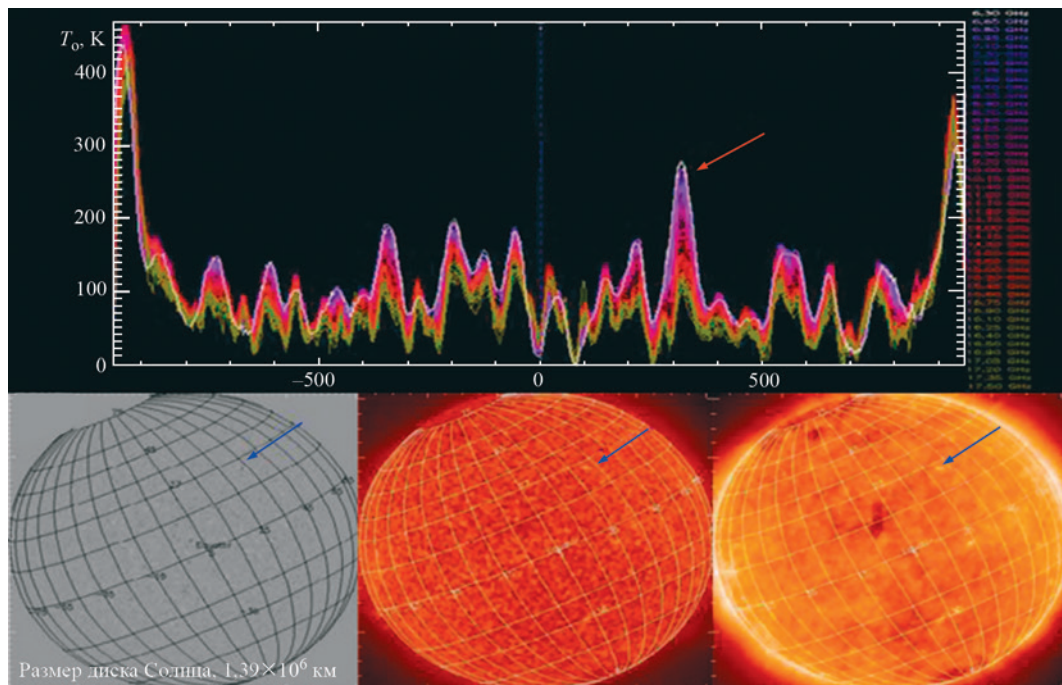
Обстоятельства затмения были уникальны. Максимальная фаза покрытия Луной солнечного диска составила 0,997. Луна, покрывая весь диск Солнца, касалась его северной зоны и оставляла полосу в 1–3". Это значительно ослабило влияние фонового излучения Солнца и четко локализовало место наблюдений. Использование нового спектрально-поляризационного комплекса в диапазоне 6,0–16,4 ГГц со спектральным разрешением 1% на 56-ти частотных каналах с высокой точностью измерения круговой поляризации (около 0,1%) позволи-



ло получить новые данные о структуре короны над Северным полюсом Солнца в течение 2,5 ч в режиме сопровождения со сменой азимутов наблюдений.

Проведенные авторами на РАТАН-600 спектральные наблюдения полярной зоны Солнца с предельной высокой чувствительностью в ходе максимальной фазы солнечного затмения, в частности, по-

зволили обнаружить существование яркого излучения в микроволновом диапазоне точно над Северным полюсом Солнца. Это излучение состоит из крупного полярного источника фонового излучения с размером около 700" (около 12 угловых минут) с интенсивностью около 1–1,5% от уровня “спокойного” Солнца и тонкой пространственной структуры с характерными разме-



рами деталей 40–70" и флуктуациями интенсивности на уровне 0,06%. Это явление интерпретировано как проявление тонкой структуры общего магнитного поля Солнца в виде ярких факельных площадок, из которых плазма истекает в корону на полюсе Солнца. Вблизи полюса Солнца они регистрируются как совокупность множества мелкомасштабных радиоисточников.

КОРОНАЛЬНАЯ МАГНИТОГРАФИЯ

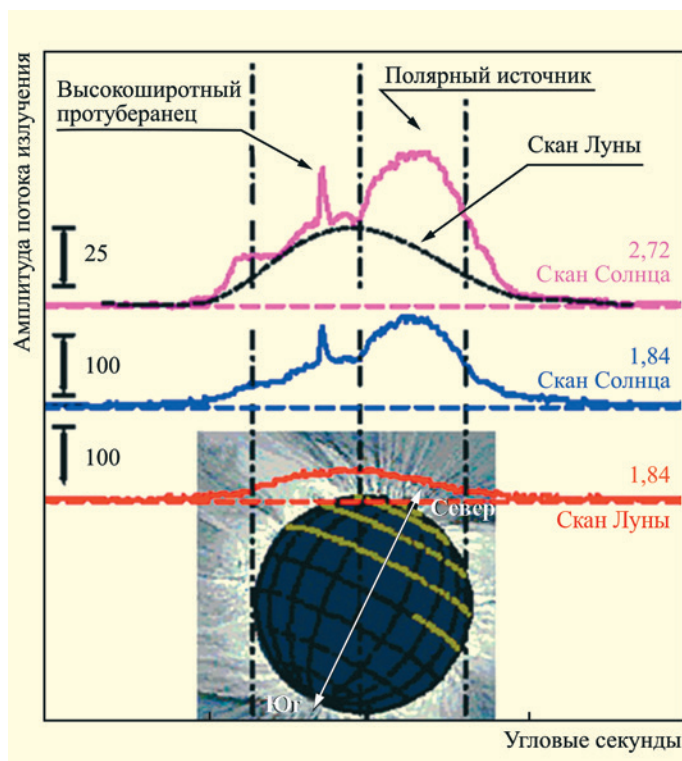
Магнитные поля – доминирующий источник энергии для нагрева солнечной короны и генерации солнечной активности – такой, как вспышки, корональные выбросы

массы и солнечный ветер. Солнечные магнитные поля формируют различные структуры корональной плазмы и участвуют в создании структуры гелиосферы, которая включает в себя Землю и другие планеты. Сегодня проблемы корональной магнитометрии рассматриваются как актуальные для решения многих вопросов солнечной активности. Прямые измерения и диагностика корональных магнитных полей находятся в зачаточном состоянии и остаются технически сложной задачей. Ожидается, что практическое использование результатов современных технологий и быстрый рост в диагностике корональных магнитных полей могут быть

Многоволновые сканы спокойного Солнца с мелкомасштабной структурой, полученные 7 октября 2009 г. на РАТАН-600 (вверху). По горизонтали отложен размер диска Солнца. Справа приведен перечень частот, использованных в наблюдении. Внизу – Солнце в линиях крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$) и Fe IX ($\lambda = 171 \text{ \AA}$). Стрелкой показано отождествление яркого источника на радиосканах и изображениях. Снимки получены 7 октября 2009 г. космической обсерваторией "SOHO". Фото NASA.

достигнуты лишь в следующем десятилетии. Между тем практические наблюдения на РАТАН-600 уже сейчас позволяют делать регулярные оценки корональных магнитных полей

Сканы Северной части диска Солнца во время затмения в Египте 29 марта 2006 г. в 15 ч 16 мин по Гринвичу на волнах 1,84 см и 2,72 см. Вверху показан "вклад" излучения Луны в регистрируемое излучение (2,72 см). Внизу – изображение короны во время полного затмения в 10 ч 40 мин по Гринвичу. Ось абсцисс представлена в угловых секундах от центра диска Солнца. Институт астрофизики, Париж.



в атмосфере Солнца над его пятнами (<http://www.sao.ru/hq/sun/>). В других странах эти измерения еще не освоены, и оценки достигаются путем моделирования будущих измерений.

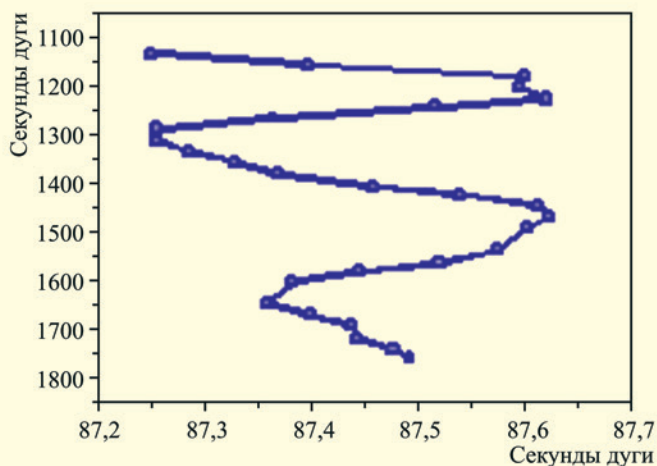
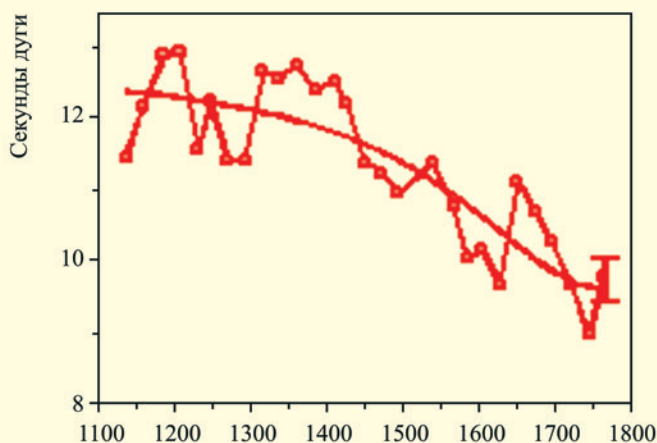
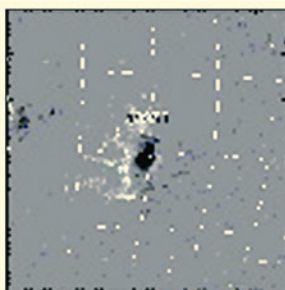
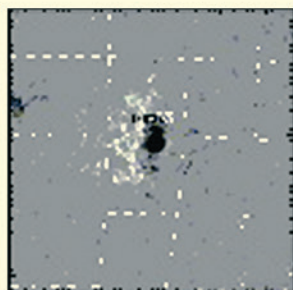
Учитывая высокую чувствительность радиоастрономического метода даже к небольшим вариациям параметров плазмы (температуре, плотности и магнитному полю), в ИПФАН, ГАО РАН и в САО РАН разработаны разнообразные методики измерения корональных магнитных полей на основе детального спектрального и поляризационного анализа в широком диапазоне волн. Измерения корональных магнитных полей в радиодиапазоне с помощью РАТАН-600 указывают на то, что общепринятые расчеты реконструкции фотосферных магнитных полей с помощью различных моделей часто не корректны: на корональ-

ных высотах – особенно если исследуются активные области, в которых происходят мощные вспышки. В связи с этим существует проблема корректного построения вертикальной структуры магнитного поля в активных областях в широком интервале высот.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Несмотря на быстрое и эффективное развитие спутниковых наблюдений, методы радиоастрономии являются единственными для прямых измерений корональных магнитных полей по поляризованному радио-

излучению. Эти исследования заложены (начиная с 1960 г.) основателями отдела радиоастрономии в Пулковской обсерватории Д.В. Корольковым, Н.С. Соболевой и Г.Б. Гельфрейхом. В дальнейшем на Большом Пулковском радиотелескопе диаметром 100 м была обнаружена и стала подробно исследоваться поляризация радиоисточников на Солнце. На РАТАН-600 большое количество работ по всем структурным объектам проведено уже при более высоком пространственном разрешении. Стало ясно, что повышение точности поляризационных измере-



Стабильная структура магнитного поля пятна на фотосфере Солнца для активной области NOAA 0953. Магнитограммы получены 2–3 мая 2007 г. на космической обсерватории “SOHO”. На графиках представлены радиоизмерения высот для каждой длины волны, соответствующие значениям магнитного поля (средний), а также высотно-долготная структура коронального магнитного поля над пятном, которая имеет вид расходящейся спирали (нижний).

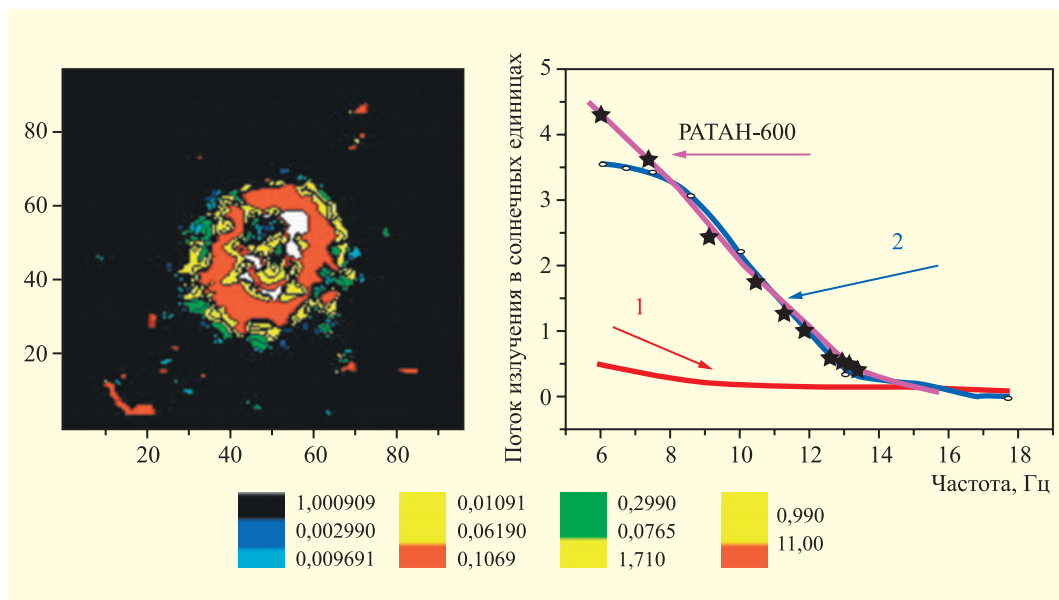
основные характеристики радиотелескопа – в частности, появилась возможность производить подробный спектральный анализ поляризованного излучения при высокой координатной точности радиотелескопа; это позволило развивать стереоскопические методы измерений. В разработках методов измерения корональных магнитных полей с помощью РАТАН-600 применялись различные механизмы тепловой плазмы:

- тепловое тормозное излучение плазмы;
- циклотронное излучение плазмы;
- инверсия круговой поляризации;
- эмиссионная томография на основе спектрально-поляризационных измерений солнечного радиоизлучения.

За прошедший 10-летний период в CAO РАН разработаны несколько новых методов измерения высотной структуры корональных магнитных

ний, многоволновый анализ спектра и высокая координатная точность являются основой для измерений корональных магнитных полей.

В последнее десятилетие особая роль отводится и методам моделирования корональных магнитных полей. Значительно улучшились



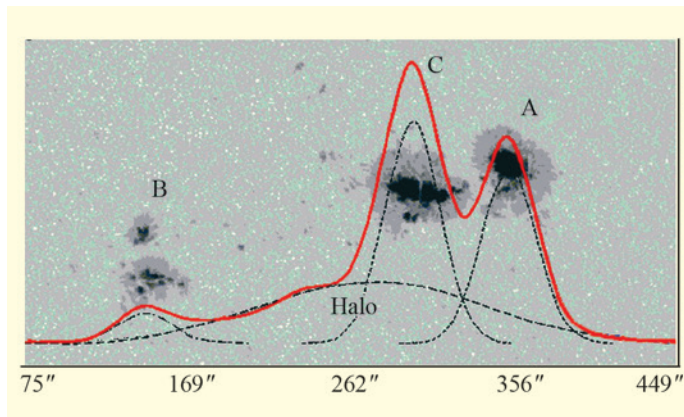
Карта коронального магнитного поля на волне 5 см для АО 10933, полученная в результате реконструкции фотосферных данных с магнитографа японской космической обсерватории "Hinode". Справа – сопоставление расчетных спектров потоков тормозного (1) и циклотронного излучений (2) с данными спектральных наблюдений на ПАТАН-600.

полей. В их числе метод динамической многоволновой стереоскопии по спектрально-поляризационным измерениям на ПАТАН-600, созданный В.М. Богодом и Л.В. Ясновым (2009). Метод позволяет выстраивать вертикальную структуру коронального магнитного поля в активных областях Солнца. Он основан на измерении координаты источника поляризованного излучения активной

области на определенной частоте при его перемещении по диску Солнца и сопоставлении точных измерений координат на уровне фотосферы (оптические данные) и в нижней короне (с точностью до 1"). Спектрально-поляризационные измерения в широком диапазоне частот дают профиль вертикального распределения поляризованного радиоисточника, который потом пересчитывается в высотный профиль напряженности магнитного поля в случае циклотронного механизма излучения. Учитывая различные отклонения (вращение пятен, широтные изменения угловой скорости вращения Солнца) становится возможным определить наклон силовой трубки магнитного поля.

Обнаружено, что корональные магнитные поля

напряженностью около 600 Гс находятся на довольно больших высотах в атмосфере Солнца – до 40–50 тыс. км, что хорошо согласуется с наблюдениями в ультрафиолете и рентгене. При этом определена расходимость силовых трубок магнитного поля в пределах 20–30% в вершинах магнитных петель. Интересным результатом таких исследований стало обнаружение спиральной высотной структуры коронального магнитного поля над стабильным пятном в активной области. Как показали статистические измерения, такие структуры встречаются часто; их существование объясняет природу большой протяженности "тонких арок", в которых осуществляется перенос энергии с помощью



Активная область NOAA 11309 на Солнце. Радиоизображение получено 30 сентября 2011 г. на РАТАН-600 на волне 3,7 см. Оно наложено на фотогелиограмму с результатами гаусс-анализа. Выделяются радиоисточники над пятнами А, В, С и широкий радиоисточник Halo, покрывающий своими размерами всю активную область.

магнитогидродинамических волн.

Он основан на использовании данных оптических магнитографов, которые реконструируются в модели влияния нелинейного бессилового магнитного поля на корональные уровни. Реконструированные карты магнитных полей проходят стадию модельных расчетов циклотронного излучения и математическую операцию свертки с диаграммой направленности радиотелескопа РАТАН-600 для каждой из 86 длин волн. Анализ пространственной структуры радиоизлучения, выполненный на основе реконструированного магнитного поля, сравнивается с многоволновыми сканами наблюдений в широком микроволновом диапазоне волн на РАТАН-600. Это позволяет локализовать места в активной области повышенной электронной плотности и дополнительного нагрева ко-

рональной плазмы. Удовлетворительное согласие между модельными расчетами корональных магнитных полей и наблюдательными данными удается достичь для активных областей с различной магнитной структурой.

МАГНИТОСФЕРЫ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

В результате проведения совместных наблюдений Солнца на интерферометре VLA (США) и РАТАН-600 были получены результаты, которые позволили сформулировать новый подход к комплексу процессов в активной области под названием магнитосфера активной области (К. Ленг, 1993) и Г. Гельфрейх, 1996).

Понятие магнитосфер Земли и активной области созвучны и многие процессы в них имеют подобную природу. Несмотря на то что размеры Земли и активной области на Солнце зна-

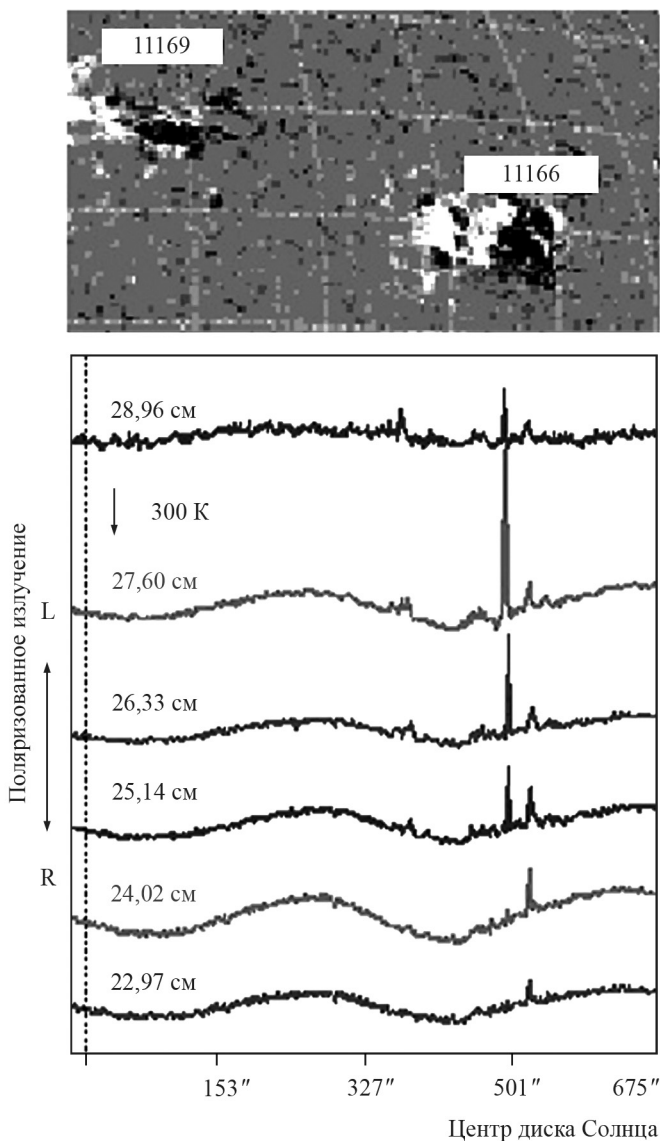
чительно различаются, тем не менее в активных областях обнаружены такие явления, как долгоживущие микровсплески и нетепловое “дециметровое гало”, свойства которых подобны радиационным поясам в магнитосфере Земли. Природа “дециметрового гало” еще не ясна, и его излучение интерпретируется как нетепловое радиоизлучение ускоренных частиц, которые захвачены радиационными поясами магнитосферы активных областей Солнца. Интенсивность этих радиоисточников весьма мала и их излучение обнаруживается только на крупных инструментах рефлекторного типа.

Установлена непосредственная связь между обнаруженным на РАТАН-600 “дециметровым гало” и нетепловым излучением длительно существующих источников – шумовых бурь (многочисленные всплески в метровом диапазо-

Микровсплески на части диска Солнца. Изображение получено 11 марта 2011 г. на радиотелескопе РАТАН-600 в дециметровом диапазоне волн 1,306–1,036 ГГц. Диаграмма последовательно сканирует весь диск (внизу). Место генерации микровсплесков центрируется на линию раздела полярностей магнитного поля NOAA 11166; в NOAA 11169 микровсплесков не обнаружено.

не) в солнечной короне (по аналогии с магнитными бурями в земной магнитосфере). В совместных наблюдениях на сантиметровых волнах на РАТАН-600 (как и на VLA) была обнаружена узкополосная двойная инверсия поляризации в активных областях с шумовыми бурями. Это явление связано с локализацией токовых слоев в верхней короне Солнца – источниками ускорения частиц и месте накопления энергии для шумовых бурь.

Долгоживущие микровсплески, обнаруженные в дециметровом диапазоне, связаны с шумовыми бурями в их метровом диапазоне. Поток микровсплесков находится в диапазоне 0,001–0,1 с.е.п. (солнечная единица потока излучения, равная 10^{-22} Вт/м² Гц) со степенью поляризации (от 10% до 100%) и продолжительностью одиночных импульсов (около 1–2 с). Микровсплески могут существовать в одной



и той же активной области в течение нескольких дней. Детальное сопоставление их с шумовыми бурями в метровом диапазоне длин волн показало, что микровсплески – это проявление излучения шумовых бурь в дециметровом диапазоне длин волн. Для определения напряженности магнит-

ного поля в местах генерации микровсплесков была использована модель двойного плазменного резонанса, а также была определена высокочастотная граница их спектра с помощью многоволнового спектрографа на РАТАН-600. Это позволило (вместе с реконструкцией корональ-

ных магнитных полей по фотосферному полю) определить их высотную структуру и электронную плотность в активных областях над нейтральной линией фотосферного магнитного поля.

Итак, в результате объединения методов измерения корональных магнитных полей с техническими параметрами радиотелескопа РАТАН-600 становится возможным детальное развитие концепции магнитосферы активной области. В нее входят практически все известные структуры, присутствующие в активной области, — от грануляции в радиодиапазоне до шумовых бурь, излучение которых проявляется на радиоволнах. Концепция магнитосферы, рассматривающая проявление радиоизлучения активной области как единый активный комплекс, позволяет пролить свет на соотношение стабильных и активных процессов и их взаимосвязи. Особенно важно определить основные пути переноса нетепловой энергии в тепловую энергию. Доминирующую роль во всех процессах играет магнитное поле, измерение которого на корональных уровнях доступно с помощью радиоастрономического метода. Интересной представляется промежуточная фаза, в которой активные области переходят из стабильной фазы во вспышечную фазу и обратно. Именно

в предвспышечной фазе происходят процессы накопления энергии, процессы формирования токовых слоев, пекулярных источников, возникающих над нейтральной линией магнитного поля. К ней относятся и послеэруптивная (послевспышечная) фаза, в которой нетепловое излучение стабилизируется и переходит в тепловую фазу. В ней при наличии источников возмущений (выход нового магнитного потока, нестабильные магнитные конфигурации и др. возмущения) может создаться повторная вспышечная ситуация. Многочисленные поиски критериев прогноза вспышек на Солнце связаны именно с поиском источников первоначальных возмущений и первичного разогрева.

Впервые на основе спектров яркостной температуры излучения радиоисточников над пятнами, выполненные с высоким спектральным разрешением порядка 1% (что соответствует разрешению по высоте в атмосфере Солнца порядка 60 км), была исследована тонкая структура переходной области между хромосферой и короной.

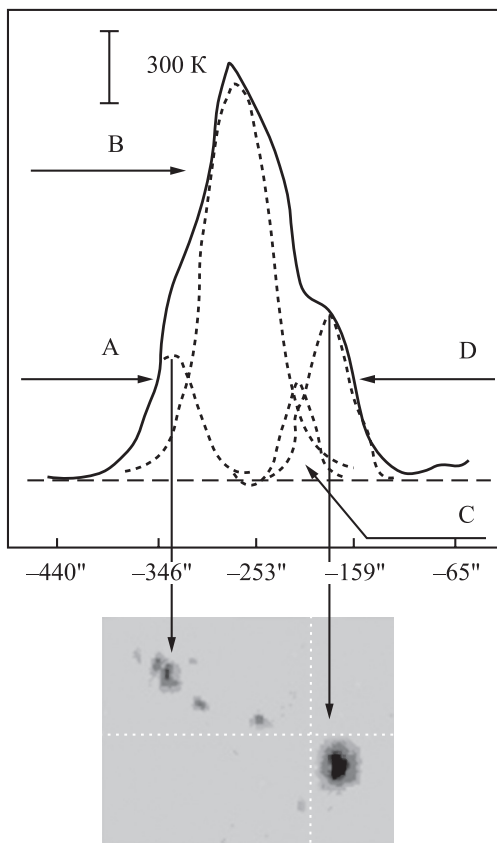
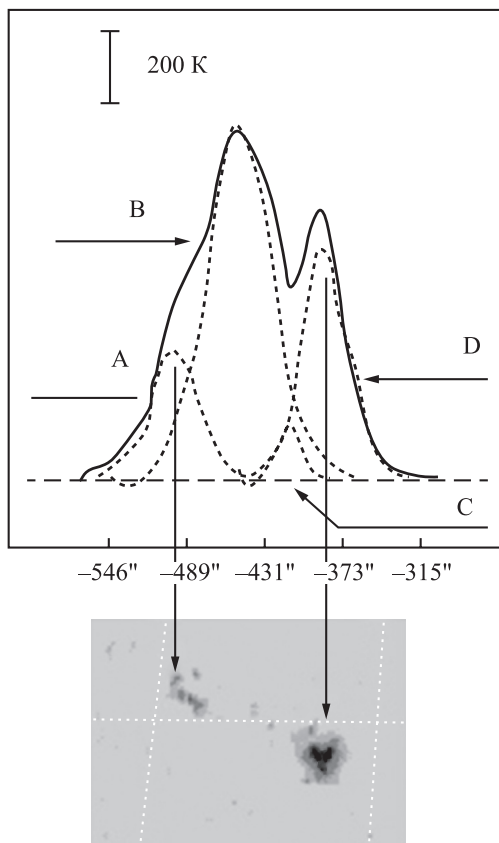
Привязка по высоте сделана с использованием моделей коронального магнитного поля, которые согласованы с наблюдениями фотосферных магнитных полей. Оказалось, что распределение температуры в переходной

области носит плавный характер в диапазоне высот от 2 до 5 тыс. км, что значительно отличается от известных моделей переходной области с резким ростом температуры. Благодаря высокой частоте следования точек в спектре удалось выявить и оценить ошибки в измерениях плотности потока, которые в большей части диапазона (2,5–5 см) не превышают 10–20%. Полученные данные существенно корректируют модель атмосферы над пятном.

ПРИРОДА
ПЕКУЛЯРНЫХ
РАДИОИСТОЧНИКОВ

Этот тип радиоисточников располагается в короне в пространстве между пятнами над нейтральной линией фотосферного магнитного поля в активной области (АО). Здесь видно, что источник максимальной яркости находился между пятнами, тогда как над пятнами радиоисточники слабее. Такие объекты являются кандидатами в источники первичного разогрева плазмы во вспышечных АО. По многоволновым наблюдениям на РАТАН-600 построенные спектры потоков и степеней поляризации таких источников в диапазоне 4–17 ГГц.

Результаты моделирования пекулярных радиоисточников указывают на то, что их интенсивное излучение и слабая



Скан на волне 3,0 см активной области NOAA 11358, которая образовалась 27 ноября (слева) и 28 ноября 2011 г. Слева направо вписаны циклотронные источники A и D над пятнами. Самый яркий источник B находится в пространстве между пятнами. Источник C связан с "всплытием" нового магнитного потока. Внизу приведено сопоставление со структурой фотосферного магнитного поля по данным космической обсерватории "SDO" в линии 4500 Å.

ном поле. Интерпретация радиоизлучения радиоисточников над линией раздела магнитных полярностей учитывает особенность их расположения в верхней части корональной арки (или аркады) и особенностей структуры коронального магнитного поля в пространстве между пятнами на Солнце.

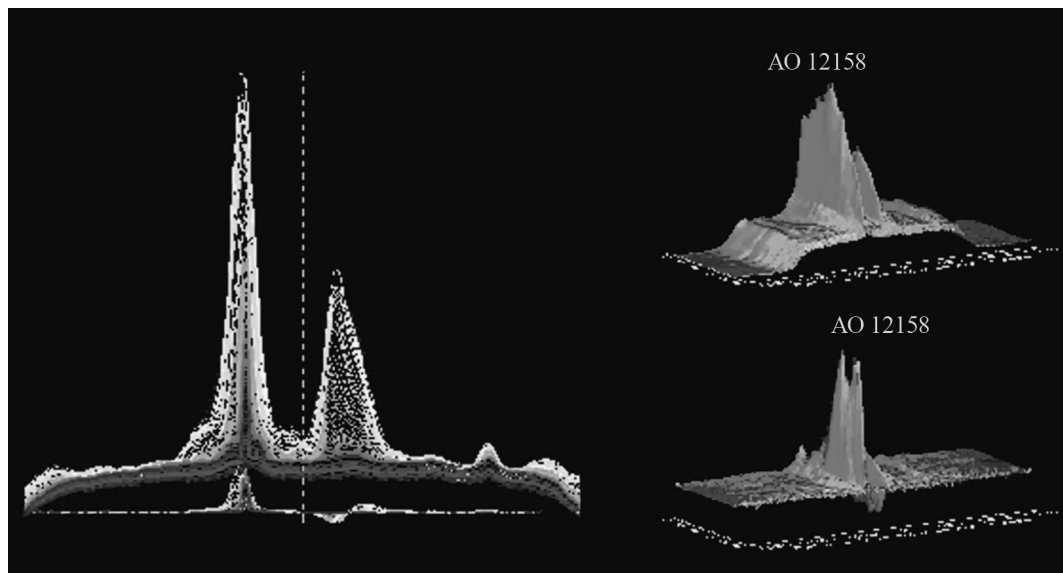
МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Солнце привели к значительному углублению знаний о природе их активности на высотах переходного слоя и нижней короны Солнца. Обнаружены различные проявления инверсий знака круговой поляризации в микроволновых спектрах излучения. Это явление проявляется в излучениях вспышечных активных областей (на разных стадиях развития, начиная с предвспышечной) и, вероятно, отражает глубинные процессы в них.

Рассмотрено несколько механизмов, которые приводят к двойной ин-

поляризация могут быть объяснены циклотронным тепловым излучением в поперечном магнит-

Возможности ПАТАН-600 в детальном исследовании спектров поляризованного радиоизлучения активных областей на



версии знака поляризации по частотному спектру и к эффекту “провала в спектре”. Подробно изучены: линейное взаимодействие волн в области квазипоперечного магнитного поля; распространение радиоволн через область с нулевым магнитным полем; распространение радиоволн через вышележащие токовые слои; рассеяние радиоволн при прохождении через волокна и магнитные дыры, в которых направление коронального магнитного поля меняет знак – на направление к наблюдателю. Результаты модельных расчетов теплового циклотронного излучения простейшей трехмерной горячей петли (тора) показали, что горячая корональная петля заметно влияет на характеристики излучения солнечной активной области на сан-

тиметровых и дециметровых волнах. Эти модели сопоставлялись с результатами наблюдений на РАТАН-600 для активных областей, в которых эффект инверсии поляризации был близок к расчетным.

ПРОГНОЗ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

На РАТАН-600 проводится программа мониторинга солнечной активности с использованием многоазимутального режима (по заявкам CAO РАН, ГАО РАН, ИСЗФ) и идет формирование многоволновой базы данных активности в диапазоне 3–18 ГГц на различных этапах ее развития – предвспышечной, вспышечной и послевспышечной фазах.

Для прогноза вспышечной активности принят критерий Танаки – Еноме,

Многоволновые сканы активного Солнца. За одно сканирование диска получаются спектры интенсивности и круговой поляризации во всех активных областях на диске. В течение 3 ч сделано до 60 сканов Солнца в диапазоне 3–18,2 ГГц на 80 частотах одновременно.

учитывающий уярчение потока излучения на волне 3 см относительно волны 8 см и его модернизированные версии для многоволновых наблюдений. Критерий удовлетворительно работает для мощных вспышек и протонных событий. Однако в связи с пониженной активностью 24 цикла проводился поиск адекватного критерия и для прогноза вспышек с меньшим рентгеновским классом М (а также класса С большого

Облучатели “на входе” солнечного приемного комплекса, установленные в кабине приемного зеркала № 3 радиотелескопа РАТАН-600 для многооктавного перекрытия частотного диапазона 0,75–18,2 ГГц. Они обеспечивают прием сигналов круговой поляризации с высокой точностью (лучше 0,1%).



уровня). На сайте Санкт-Петербургского филиала CAO РАН (http://www.spbf.sao.ru/cgi-bin/ion-r?page=rat_search.ion) диагностика критерия осуществляется в автоматическом режиме. Продолжается работа по созданию комплексного критерия, в котором будут учитываться данные фотосферных наблюдений, данные ультрафиолетовых и рентгеновских наблюдений. На сайте CAO РАН (<http://www.sao.ru/hq/sun/>) также ведутся регулярные измерения величины коронального магнитного поля Солнца для всех активных областей на диске, что уникально. Для повышения качества прогнозирования используются обнаруженные на РАТАН-600 особенности в спектрах поляризации активных областей в предвспышечном состоянии. Примечательно, что при каждом наблюдении на РАТАН-600 получают информацию о спектрах

интенсивности, а также о круговой поляризации практически для всех активных областей Солнца, присутствующих на диске; полученные данные говорят о величине коронального магнитного поля.

Спектрально-поляризационные данные радиотелескопа РАТАН-600 часто используются при проведении комплексных исследований (совместно с наблюдениями на космических аппаратах для изучения и прогноза солнечных, межпланетных и магнитосферных возмущений).

ПРИЕМНАЯ АППАРАТУРА

В 2011 г. завершена модернизация приемной аппаратуры для исследования солнечного радиоизлучения на РАТАН-600. Вдвое увеличено перекрытие частотного диапазона, которое сейчас достигает 0,75–18,2 ГГц. Частотное разрешение составляет 50–100 МГц, или около 1%. В сочета-

нии с большой эффективной площадью крупного радиотелескопа РАТАН-600 новая аппаратура предоставила новые возможности для исследования тонкой структуры радиоизлучения солнечной короны. В области солнечной радиоастрономии в настоящее время этот приемный комплекс является уникальным.

Результаты регулярных наблюдений Солнца проходят автоматическую обработку и выставляются в сети интернет на сайте: <http://www.spbf.sao.ru/prognoz/> в оперативном режиме, через 4 мин после проведения наблюдения. На базе сервера в Санкт-Петербургском филиале CAO РАН создан Центр анализа многоволновых наблюдений Солнца на РАТАН-600. Он автоматически собирает информацию с многоволнового спектрографа облучателя № 3 на РАТАН-600, обрабатывает и представляет ее в удобном виде

для сопоставления с данными других наземных и спутниковых обсерваторий.

Для обеспечения высококачественных наблюдений Солнца весьма важно измерять и учитывать характеристики радиотелескопа. Детально исследовались поляризационные свойства антенной системы – как с помощью практических измерений, так и модельных вычислений. Высокая точность достигалась оптимизацией характеристик облучения антенной системы с использованием широкодиапазонных первичных облучателей. Важное место для работы радиотелескопа – юстировка (измерение точности отражательных панелей и их относительной привязки друг к другу). На радиотелескопе существует разнообразие методов юстировок для работы отдельных секторов инструмента. В связи с этим сейчас находятся в разработке методы, направленные на использование излучения геостацио-

нарных спутников Земли (в том числе и на основе технологии радиолокации).

Однако эффективность дальнейшего использования РАТАН-600 тормозится из-за ряда факторов: одномерность пространственного разрешения; ограниченная возможность проведения слежения за отдельным объектом на Солнце ввиду транзитной схемы инструмента; недостаточная точность формирования отражающей поверхности ввиду длительной эксплуатации, что связано с увеличением величины люфтов в механизмах перемещения.

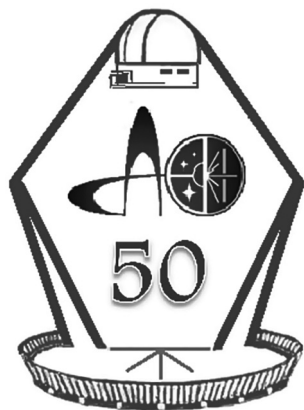
Перспективы солнечных исследований связаны, главным образом, с проектом модернизации радиотелескопа в части перекрытия 8-октавного диапазона радиоволн (от 0,5 м до 3 мм); реализации режима слежения для задач по колебательным характеристикам солнечной плазмы.

Важным параметром для солнечной радиоастрономии будет освое-

ние миллиметрового диапазона волн, который оказался “неохваченным” крупными инструментами после начала работы радиотелескопа ALMA. Расширение рабочего диапазона 1–100 ГГц, высокое пространственное разрешение в сочетании с матричным картографированием и временными характеристиками превратят радиотелескоп РАТАН-600 в уникальный инструмент – как в области солнечной физики, так и в других областях астрономии.

Для полноценных исследований физики солнечной короны нужен крупный инструмент с высокими точностями по измерению поляризации, по координатным измерениям, с высокой чувствительностью в широком диапазоне волн.

Большое количество новых данных, обнаруженных с помощью РАТАН-600 при изучении процессов в плазме солнечной атмосферы, рассматривается как часть общей физической проблематики в астрономии.



Телескоп БТА в поиске проявлений звездного нуклеосинтеза

В.Г. КЛОЧКОВА,
доктор физико-математических наук
САО РАН

Никто в Институте этого не понимал, но все знали это настолько твердо, что понимать и не пытались.

“Понедельник начинается в субботу”

А. и Б. Стругацкие

Первичный газ в ранней Вселенной представлял собой смесь водорода и гелия с примесью легких элементов (Li, Be, B). Позже, в ходе эволюции и взрывов массивных звезд первого поколения, началось формирование ядер более тяжелых химических элементов (C, O, Ne, Mg, Si и Fe). Однако все богатое разнообразие химических элементов в настоящее время “создано”



за счет последующего наслаения результа-

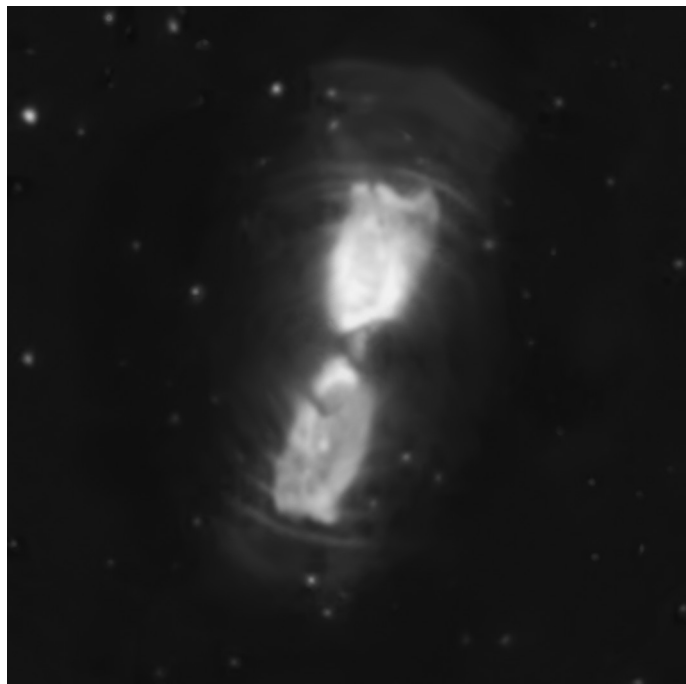
тов звездного нуклеосинтеза (совокупности процессов ядерного горения, происходящих в недрах звезд различных масс и обеспечивающих синтез ядер химических элементов, для нескольких звездных популяций). В данном контексте предметом нашего рассмотрения будет синтез химических элементов тяжелее железа.

ОБ ЭВОЛЮЦИИ ЗВЕЗД
ВБЛИЗИ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ
ВЕТВИ ГИГАНТОВ

В последнее время особый интерес астрофизиков (как теорети-

ков, так и наблюдателей) вызывают звезды на асимптотической ветви гигантов (AGB): на этой эволюционной стадии наблюдаются звезды массой менее $8 M_{\odot}$ (после

выгорания в ядрах гелия). Этот пристальный интерес объясняется тем, что именно в недрах звезд, находящихся на столь кратковременном промежутке, как AGB-стадия



Инфракрасный источник IRAS17150–3224. Изображение наблюдений получено в 1997 г. с помощью широкоугольной камеры Космического телескопа Хаббла в видимом и ИК-диапазонах. Иерархия деталей различного масштаба (дуги и джеты) с различающимися скоростями молекулярных облаков, дуг и джетов представляет собой вещество, потерянное звездой за счет звездного ветра. Фото NASA.

(ее характерная продолжительность несколько тысяч лет), создаются физические условия для синтеза ядер металлов и выноса свежесформировавшихся продуктов ядерных реакций на поверхность звезды. Получается, что AGB звезды – это своеобразный “завод” по производству металлов, который обогащает межзвездную среду галактик. Основным технологическим процессом производства тяжелых ядер является нейтронизация ядер железа и ядер более тяжелых металлов.

Напомним основные представления о звездах на стадии AGB. Пройдя несколько последовательных этапов эволюции за счет смены термоядер-

ных источников, эти звезды наблюдаются в виде холодных красных сверхгигантов высокой светимости, активно теряющих вещество за счет звездного ветра. Темп потери массы может достигать $4 \times 10^{-5} M_{\odot}$ в год, что обеспечивает формирование околозвездной протяженной газопылевой оболочки. В этой фазе звезда за короткое (в эволюционной временной шкале) время теряет до 40–80% своей массы, “поставляя” в околозвездную среду вещество, обогащенное тяжелыми металлами, синтезированными самой звездой. Дальнейший жизненный путь звездного остатка с массой около $0,6 M_{\odot}$ считается финалом эволюции звезды, он завершает ее пере-

ход в фазу планетарной туманности, а затем – в энергетически пассивное состояние остывающего белого карлика.

Основные представления о природе планетарных туманностей как заключительной стадии эволюции звезд промежуточных масс (примерно $3\text{--}8 M_{\odot}$) были сформулированы более полувека назад И.С. Шкловским (см. статью Л.М. Гиндилиса в этом номере журнала). Именно тогда, до формирования ядерной астрофизики как отдельного направления, Шкловским были сделаны выводы о связи между красными гигантами (сверхгигантами), планетарными туманностями и белыми карликами; о дискретном характере образования расширяющейся оболочки вследствие отделения внешних слоев красного гиганта; об эволюции звездного ядра, приводящей к образованию белого кар-

лика. В последующие десятилетия были развиты наземные и внеатмосферные методы наблюдений в оптическом, инфракрасном, субмил-

Туманность RAFGl 2688, окружающая postAGB-звезду V1610 Лебедя. Звезда входит в небольшую подгруппу postAGB-звезд, в атмосферах которых (по наблюдениям на БТА) найдены большие избытки углерода и тяжелых металлов. На снимке видны мощные джеты и дуги, образовавшиеся за счет нескольких эпизодов сброса массы на AGB и postAGB. Центральная звезда закрыта от наблюдателя мощным пылевым баром. Изображение получено в октябре 2002 г. с широкоугольной камерой Космического телескопа Хаббла. Фото NASA.

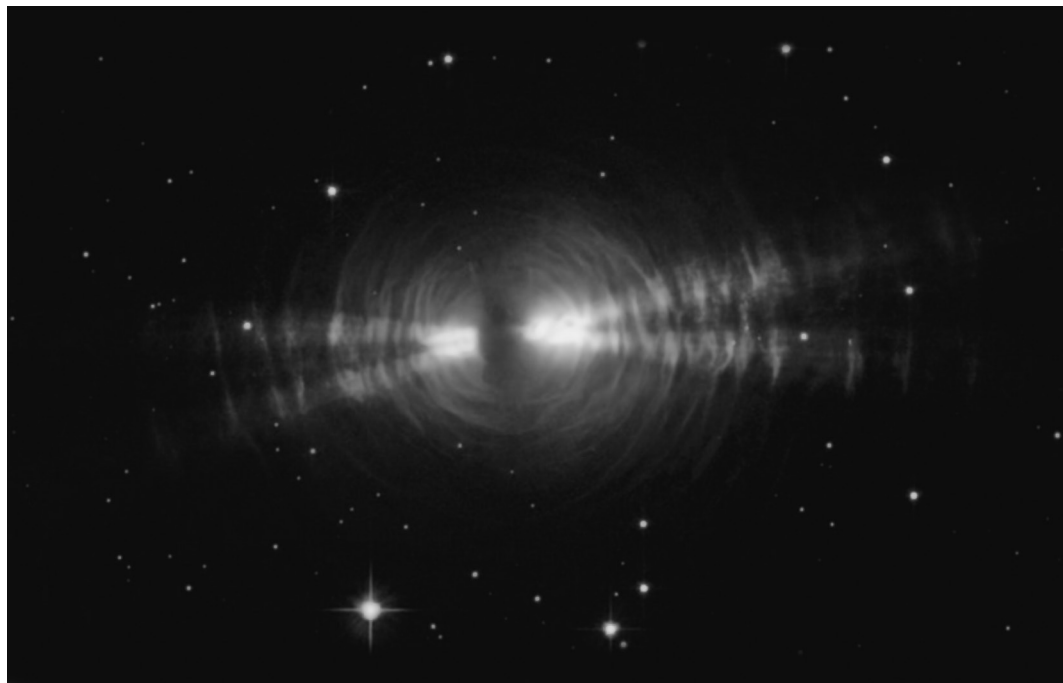
лиметровом и радиодиапазонах, и накоплены многочисленные наблюдательные данные, которые позволили более детально изучить эволюцию звезд малых и промежуточных масс.

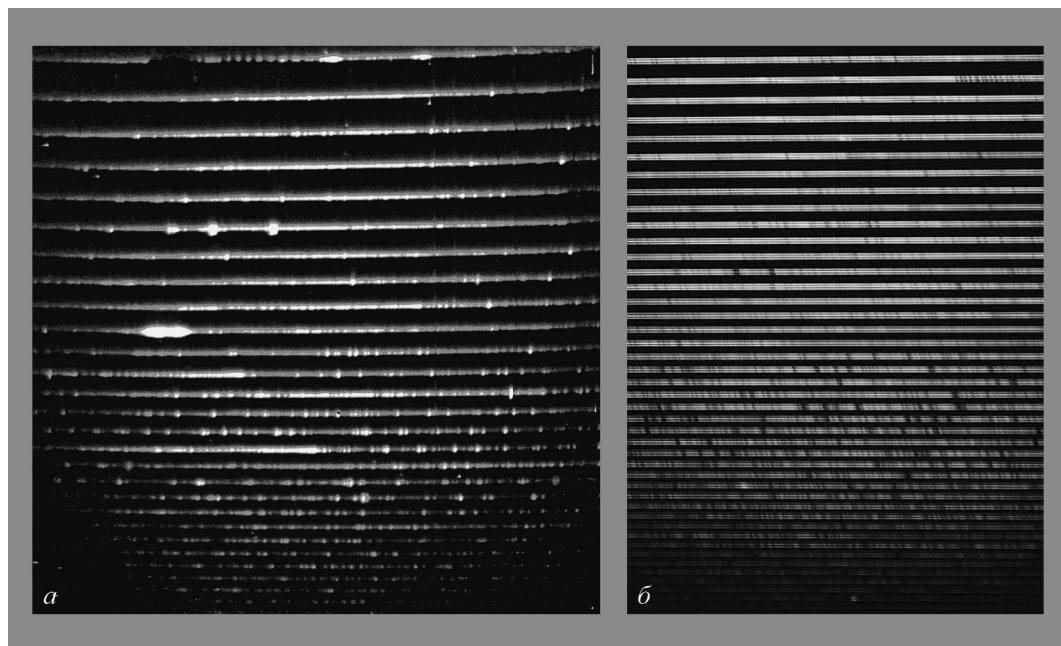
Вырожденное углеродно-кислородное ядро AGB-сверхгиганта окружено двумя тонкими и попеременно энергетически активными слоями с неустойчивым горением водорода и гелия. Данная конфигурация звезды неустойчива; теория предсказывает достаточно эффективное перемешивание и вынос за счет проникающей конвекции в атмосферу звезды вещества, переработанного в ядерных реакциях, которые сопровождают указанные процессы вы-

деления энергии. Важными элементами строения звезды являются слои с мощной конвекцией. За счет проникновения конвекции в слои, содержащие вещество, обогащенное тяжелыми металлами, оно оканчивается на поверхности звезды. Этот вынос вещества, обусловленный многократно повторяющимся чередованием тонких энергетически активных слоев водорода и гелия, принято называть третьим перемешиванием.

СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОБОЛОЧКИ AGB-ЗВЕЗД

В рассмотрении проявлений нуклеосинтеза нам помогут некоторые детали формирования и осо-





бенностей строения околозвездных оболочек. Звездный ветер на стадии AGB обычно обладает сферической симметрией, что и определяет преимущественно сферическую форму медленно расширяющихся оболочек у этих звезд. Однако их ближайшие потомки — звезды на стадии после AGB (далее в тексте — postAGB звезды) — это объекты, центральная звезда которых окружена, как правило, несферической оболочкой сложной структуры. Качественно новый уровень понимания структуры и динамики оболочек вокруг далеко проэволюционировавших звезд обеспечивают их наблюдения с помощью Космического телескопа Хаббла. Именно наблюдения

с этим телескопом выявили биполярную структуру и джеты у многих объектов, ранее наблюдавшихся как точечные. По мере накопления детальных изображений выяснилось, что в оболочках многих postAGB звезд замечены образования в виде дуг, которые указывают на то, что потеря их вещества происходила в ходе нескольких эпизодов усиления ветра. Дуги — это проекция фрагментов сферических оболочек, оставшихся после эволюции звезды на AGB. Хорошим примером являются неоднородные изображения ИК-источников IRAS17150–3224 и RAFGL 2688, полученные с широкоугольной камерой космического телескопа.

Теоретическое изучение эволюции звезд

Эшельные спектры, полученные на БТА: а — FG Стрелы в интервале длин волн 4700–8550 Å. В центре кадра мощная эмиссия в D-линиях NaI. Ниже, через пять порядков, хорошо видна сильная эмиссионная полоса Свана 5165 Å молекулы C₂; б — красного сверхгиганта R Жирафа в интервале длин волн 3550–6980 Å. Две узкие эмиссии в нижней половине кадра — линии нейтрального водорода H_δ и H_γ. Две сильные абсорбции на 13-м порядке сверху — это D-линии NaI.

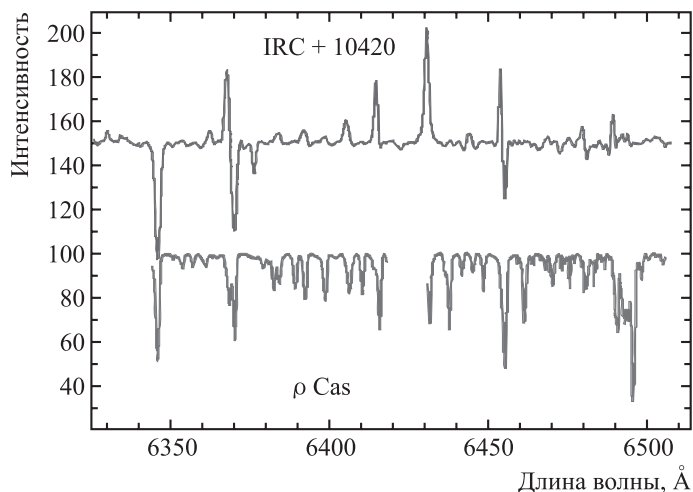
вблизи AGB затруднено из-за непростой структуры этой системы, включающей, по крайней мере, две компоненты: продолжающую свою эволюцию центральную звезду и остывающую оболочку, которая может иметь довольно непростую

Фрагменты спектров двух желтых гипергигантов V1302 Орла (кривая красного цвета) и ρ Кассиопеи. Наблюдения выполнены автором на БТА с эшелъным спектрографом НЭС.

конфигурацию. Много неясностей остается в понимании звездного ветра, а также процесса конвекции, а, следовательно, и выноса вещества на поверхность звезды. Сформировалось представление о том, что, наряду с исходной массой звезды, темп ее потери в ходе эволюции относится к важнейшим параметрам и определяет не только окончательную массу звезды после фазы AGB, но и ее внутреннюю структуру, а также временные шкалы эволюции звезды на заключительных фазах, а также степень изменения химического состава поверхностных слоев.

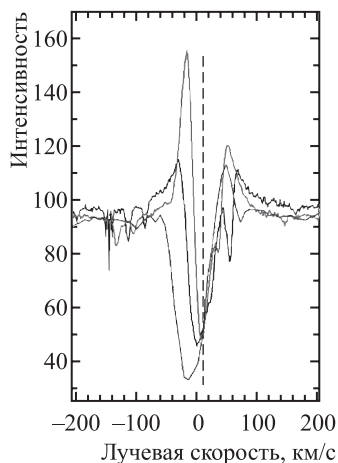
СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗД ВБЛИЗИ AGB

Мощные околозвездные оболочки AGB-звезд излучают в ИК-области и создают таким образом избытки ИК-потoka, вследствие чего распределение энергии в спектрах этих звезд становятся двугорбыми. Важный этап в исследовании звезд с большими избытками инфракрасного потока обеспечила космическая обсерватория "IRAS" (1983). За



время работы обсерватории ИК-телескоп "просмотрел" почти 95% всей небесной сферы. Одним из результатов этого обзора стало выделение ИК-источников на высоких широтах Галактики, представляющих собой околозвездные оболочки с температурами от 200 до 1000 К. Впоследствии часть этих объектов была отождествлена со звездами высокой светимости, предположительно на эволюционной стадии postAGB. Существование пылевых оболочек сильно подавляет излучение звезд в видимой области спектра, поэтому лишь небольшая часть выделенных объектов доступна спектроскопическим наблюдениям в оптическом диапазоне с высоким разрешением. После выделения нового типа далеко проэволюционировавших звезд с большими избытками ИК-потoka на многих крупных телеско-

пах мира выполняются программы спектроскопии postAGB и AGB звезд с целью изучения особенностей их аномальных спектров, кинематического состояния истекающих атмосфер и протяженных околозвездных оболочек. Это делается, прежде всего, для изучения процесса звездного нуклеосинтеза, сопровождаемого выносом переработанного вещества в атмосферу звезд. На 6-м телескопе БТА в сочетании с современными эшелъными спектрографами (отличается от классических тем, что его оптическая схема содержит дополнительный диспергирующий узел, позволяющий компактно разместить изображение спектра высокого разрешения на поверхности ПЗС-матрицы), под руководством автора также выполняется такого рода наблюдательная программа, что позволило получить несколько



Переменность профиля спектра в линии H_{α} для нескольких моментов наблюдений postAGB-звезды V5112 в Стрельце. Спектры получены автором в 1996–2012 гг. на БТА с эшелльным спектрографом НЭС.

принципиально новых результатов, касающихся особенностей спектров, их переменности, а также химического состава звездных атмосфер и оболочек.

Спектры поздних сверхгигантов (класса F, G) на стадии AGB и postAGB позволяют оценить содержание легких элементов и тяжелых металлов, синтезируемых в процессах нейтронизации ядер железа. Сложность теоретического изучения звездного нуклеосинтеза состоит в том, что эффективность синтеза и выноса свежих ядер на поверхность звезды зависит от большого числа факторов: исходной мас-

сы звезды, ее металличности, параметров истечения вещества, деталей процесса нуклеосинтеза и перемешивания. Поэтому, помимо классической проблемы исследования химического состава звезд на нетривиальных стадиях эволюции, самостоятельный интерес представляет и возможность изучения процессов обмена веществом между звездной атмосферой и околозвездной пылевой оболочкой, а также поиск механизмов, объясняющих аномалии химического состава атмосфер звезд, окруженных пылевыми оболочками.

Для решения перечисленных задач на БТА с эшелльным спектрографом НЭС выполняются спектральные наблюдения с высоким разрешением ($R = 60\,000$), что позволяет разделять слабые и близко расположенные спектральные линии, используемые для изучения химического состава атмосфер и оболочек. Для наблюдений слабых объектов программы используется спектрограф PFES в первичном фокусе БТА, обеспечивающий необходимое для нашей задачи качество спектров для объектов с $V \leq 14,5^m$ при спектральном разрешении $R = 15\,000$.

Для определения основных параметров моделей атмосфер звезд (эффективной температуры, ускорения силы тяжести) и для расчетов химиче-

ского состава используются теоретические сетки моделей звездных атмосфер. В первой же нашей работе, посвященной определению химического состава postAGB-звезд, в атмосфере одного из объектов программы – сверхгиганте CY Малого Пса (оптический компонент ИК-источника IRAS07134 + 1005) – были обнаружены большие избытки углерода и тяжелых металлов (Y, Ba, La, Eu). Впоследствии мы назвали CY Малого Пса каноническим postAGB-объектом, обладающим всеми признаками, характерными для звезд на данной стадии эволюции. Большой избыток ИК-потока делает двугорбым распределение ее энергии; характер переменности блеска звезды свойствен пульсирующим переменным; сверхгигант обладает протяженной околозвездной оболочкой, проявляющейся в оптическом спектре полосами молекулы C_2 , и измененный в ходе эволюции химический состав атмосферы.

Последующие исследования, проведенные в 1995–2015 гг. на БТА, а также на нескольких крупных оптических телескопах мира зарубежными астрономами, позволили сделать ряд новых выводов. Оказалось, что среди звезд с большими избытками ИК-излучения (помимо AGB- и postAGB-звезд) присутствуют массивные звезды высокой

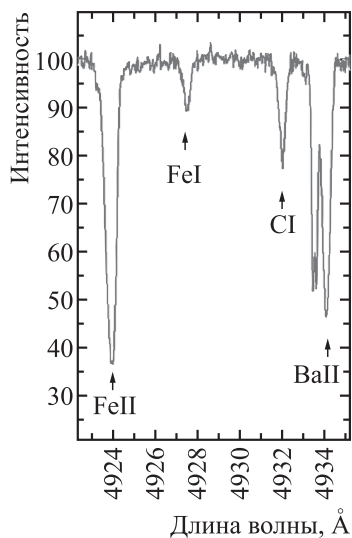
светимости с протяженными и структурированными околосветными оболочками. Наиболее известным объектом, который много лет рассматривали как звезду на стадии postAGB, является звезда V1302 в созвездии Орла, обладающая рядом особенностей. Долгое время эволюционный статус этого сверхгиганта, ассоциированного с мощным источником ИК-излучения IRC + 10420, был неясен. Совокупность наблюдаемых свойств звезды позволяла рассматривать объект как звезду на стадии postAGB или же как очень массивную звезду, прошедшую стадию красного сверхгиганта. Очевидно, что в зависимости от принятого статуса (а, следовательно, и светимости объекта), оценка его удаленности от наблюдателя может различаться в несколько раз.

Сведения, полученные в последние десятилетия в ходе различных наблюдательных экспериментов, не оставляют сомнений в принадлежности V1302 Орла к крайне редко наблюдаемым объектам – желтым гипергигантам (самые мощные и яркие звезды массой 100–250 $M_{\odot}$ и размером до 1708 $R_{\odot}$, одновременно самые редкие и короткоживущие). Более того, V1302 Орла, светимость которой составляет $L \approx 5 \times 10^5 L_{\odot}$, рассматривается теперь как наиболее бесспорный

в Галактике массивный объект (с исходной массой 20–40 $M_{\odot}$) с рекордным темпом потери вещества, находящийся на кратковременном эволюционном переходе – от массивных красных сверхгигантов к звездам типа Вольфа – Райе. Спектр V1302 Орла насыщен сложными эмиссионными профилями линий; в то же время спектр родственной звезды – желтого гипергиганта ρ Кассиопеи – преимущественно абсорбционный (в нем преобладают линии поглощения). Решающий аргумент, подтверждающий для V1302 Орла статус массивной звезды с предельно высокой светимостью, был получен на основе спектральных данных БТА: мы смогли впервые определить химический состав ее атмосферы и обнаружить значительный избыток азота, служащий признаком массивной звезды.

Еще один из объектов программы – сверхгигант V510 в созвездии Кормы – наглядный пример спектральной мимикрии. Светимость этой postAGB-звезды едва достигает уровня светимости сверхгиганта, в то же время параметры ее ветра близки к параметрам ветра гипергигантов. В спектре V510 Кормы аномально сильны абсорбции ионов иттрия и других тяжелых металлов. Все абсорбционные компоненты смещены в коротковолновую область спектра,

что указывает на истечение звездного вещества. Околосветная оболочка сверхгиганта проявляется в оптическом спектре, в частности, в виде молекулярных полос углеродсодержащих молекул C_2 и CN. Линия H_{α} имеет абсорбционно-эмиссионный профиль, эмиссия в нем многократно превышает уровень непрерывного спектра звезды, что говорит о наличии мощного звездного ветра. Различия скоростей, измеренных по различным деталям в пределах одного спектра, достигают 100 км/с, в основном за счет вза-



Фрагмент спектра postAGB-звезды V5112 в созвездии Стрельца, содержащий линию BaII ($\lambda = 4934 \text{ \AA}$), расщепленную на три компоненты, при этом сильная абсорбция FeII не содержит оболочечных компонентов. Спектр получен автором на БТА с эшелливым спектрографом НЭС.

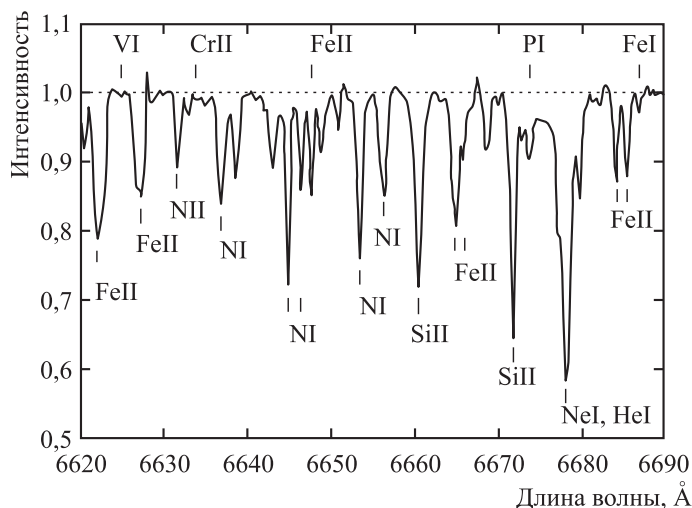
имных сдвигов эмиссионных и абсорбционных компонентов, но также и вследствие систематического изменения скорости с интенсивностью и длиной волны линии. Такие большие дифференциальные сдвиги линий и их составляющих ясно говорят о градиенте скорости движения вещества в тех слоях атмосферы V510 Кормы, где эти линии формируются.

Следующий важнейший результат спектроскопии postAGB звезд – неоднородный химический состав их атмосфер. Избыток тяжелых металлов, ожидаемый для звезд на стадии postAGB (как следствие предшествующей эволюции звезды и процесса третьего перемешивания) наблюдается пока крайне редко. За два десятилетия поисков нам удалось обнаружить избытки таких элементов лишь у семи

postAGB-звезд. Анализ совокупности наблюдаемых свойств тех postAGB-объектов, в атмосферах центральных звезд которых выявлены большие избытки углерода и тяжелых металлов, позволил выяснить, что околозвездные оболочки этих избранных звезд имеют сложную морфологию; они также обогащены углеродом, что согласуется с наличием молекулярных полос C_2 , C_3 , CN, CO в их ИК-, радио- и оптических спектрах. Кроме того, все объекты содержат в своих ИК-спектрах не отождествленную пока эмиссию на длине волны 21 мкм. Ее присутствие в спектрах postAGB-звезд с оболочками, обогащенными углеродом, позволяет в качестве основного агента предполагать какую-то сложную молекулу, содержащую атомы углерода.

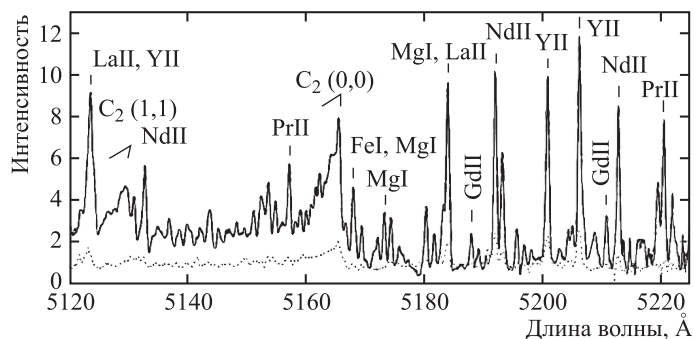
НОВЫЙ ФЕНОМЕН В СПЕКТРАХ POSTAGB-ЗВЕЗД

Коллекция спектров позволила нам изучать переменность спектра и переменность поля скоростей в атмосфере и оболочке звезды, которая объясняется сочетанием пульсаций и истечением протяженных атмосфер. Автором обнаружено неизвестное ранее для спектров postAGB-звезд явление – асимметрия и расщепление сильнейших абсорбций, возникающих при переходах с уровней, имеющих низкий потенциал возбуждения. Рассмотрим обнаруженный эффект на примере спектра postAGB сверхгиганта V5112 Стрельца с мощной и структурированной оболочкой. Найденный эффект расщепления сильных абсорбций максимален у линий ионов BaII, профиль которых в спектре V5112 Стрельца расщеплен на три компоненты. Анализ картины лучевых скоростей, выполненный нами с использованием данных радиоспектроскопии объекта, позволил сделать вывод о том, что коротковолновые компоненты



Фрагмент оптического спектра ν Стрельца, насыщенный сильными линиями атома NI, что свидетельствует об избытке азота в атмосфере этой далеко проэволюционировавшей звезды. Спектры получены автором на БТА с эшелным спектрографом НЭС.

Фрагмент спектра FG Стрелы вблизи минимума блеска звезды 19 июня 1998 г., насыщенный сильными эмиссиями молекулы C_2 и редкоземельных металлов. Точками нанесен спектр 11 июля 1998 г. спустя 20 сут после минимума. Спектры получены автором на БТА с эшелным спектрографом PFES.



расщепленных абсорбций BalI формируются в слоях структурированной оболочки звезды, расширяющихся со скоростями 20 и 30 км/с. Присутствие компонентов тяжелых металлов в оболочке указывает на эффективный перенос в нее вещества, “наработанного” в предшествующий этап эволюции звезды.

Таким образом, в результате многолетнего спектрального мониторинга на БТА обнаружен канал, по которому идет обогащение межзвездной среды тяжелыми металлами структурированной оболочки звезды на стадии postAGB; однако лишь у трех из этих postAGB-звезд тяжелые металлы обнаружены в околозвездных оболочках.

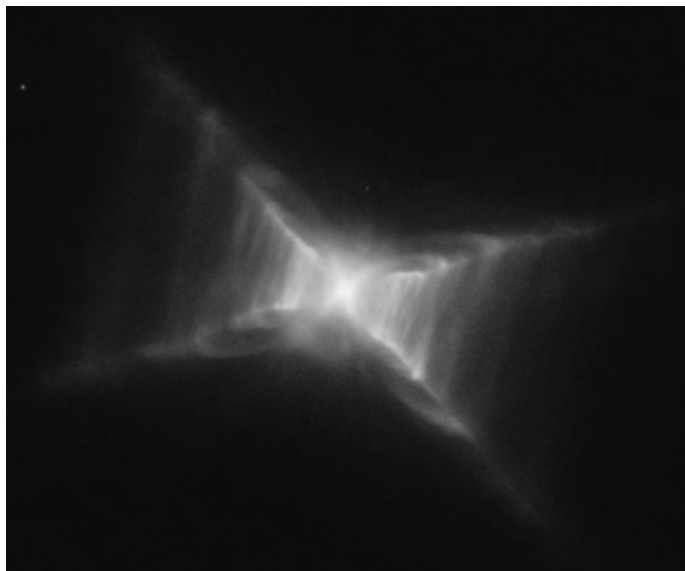
ОСОБЫЕ ПРЕДСТАВИТЕЛИ СЕМЕЙСТВА POSTAGB-ЗВЕЗД

В заключение остановимся на некоторых редких типах звезд, наблюдаемых на стадии postAGB: это малочисленная группа тесных двойных систем с большим дефицитом водо-

рода в атмосфере. В настоящее время известны только четыре (!) звезды этого типа, причем все они имеют очень близкие эффективные температуры — около 10 тыс. кельвинов. Предполагается, что сверхгигант-postAGB в составе этих двойных систем находится в фазе горения гелия в слое, окружающем вырожденное углеродно-кислородное ядро. Время жизни гелиевого сверхгиганта — всего около 10 тыс. лет, это и объясняет тот факт, что астрономы крайне редко встречаются эти звезды. Интерес к тесным двойным системам с большим дефицитом водорода вызван тем (согласно современным представлениям), что они считаются предшественниками сверхновых SNIa. Главными особенностями прототипа этих тесных двойных (к примеру, у сверхгиганта ν Стрельца, имеющего спектральный класс Sp = A2Ia), являются сильная и переменная эмиссия в линии H_α и большой избыток ИК-излучения. По спектрам, полученным на БТА (с привлече-

нием данных из архива 2-м телескопа обсерватории Пик дю Миди, Франция), определен детальный химический состав атмосферы сверхгиганта в системе ν Стрельца: пониженное на пять порядков содержание водорода и многократные избытки тяжелых металлов в атмосфере; спектр звезды насыщен линиями атома Ni — содержание азота повышено на порядок. Таким образом, химический состав атмосферы этой звезды кардинально изменен в ходе ее собственной эволюции.

Завершим статью рассмотрением свойств наблюдаемой особенной звезды FG Стрелы. Предельно интересной является история изменения ее поверхностного химического состава: еще в 1960-е гг. содержание химических элементов в ее атмосфере мало отличалось от солнечного, но уже спустя 10 лет в спектре звезды усилились линии редкоземельных металлов. Проведенный анализ подтвердил избыток тяжелых ме-



Планетарная туманность HD44179 в созвездии Единорога. Яркий компонент в центре является спектрально-двойной *post*-AGB-звездой массой $0,57 M_{\odot}$ и светимостью $6000 L_{\odot}$, эффективная температура – $7750 K$. Изображение получено в 2011 г. с помощью широкоугольной камеры Космического телескопа Хаббла. Фото NASA.

таллов, накопленных в ходе реакций нейтронизации и вынесенных на поверхность звезды. На 6-м телескопе БТА спектральные наблюдения FG Стрелы выполнялись многократно, начиная с 1980 г. Особенно важны наблюдения, выполненные после фотометрического минимума 2000 г., когда блеск звезды составлял около 15^m ; в этой фазе эволюции спектр звезды насыщен эмиссионными полосами молекулы C_2 , эмиссиями ионов тяжелых металлов Lall, NdII, YII, Lall, PrII. В итоге из полувекровых наблюдений FG Стрелы найдено изменение химического состава атмосферы.

Самая замечательная особенность FG Стрелы – быстрое изменение ее параметров во времени. Европейские астрономы Ван Джендерен и Гаутчи, собрав фотометрические данные за 100 лет наблюдений, восстановили ход эволюции FG Стрелы – от звезды класса O3 с максимально возможной для нормальной звезды температурой (в 1880 г.) – до K2 (в 1992 г). Таким образом, на протяжении жизни двух поколений астрономов-наблюдателей, звезда “пересекла” диаграмму Герцшпрунга – Рассела. Подобное поведение, которое наблюдается у немногочисленных родственных объектов, называют “новым рождением” (“born again

burning”). Очень горячая звезда (по сути ядро планетарной туманности) вместо того, чтобы “двигаться” к фазе остывающего белого карлика и завершить свой жизненный путь, возвращается в состояние AGB в результате вспышки в гелиевом слоевом источнике.

Итак, главным результатом наших наблюдений на БТА нескольких десятков AGB- и *post* AGB-звезд является обнаружение эволюционных избытков тяжелых металлов в протяженных атмосферах малой доли этих звезд.

Абсолютно новым результатом является обнаружение обогащения тяжелыми металлами околозвездных оболочек у трех звезд.

Солнце

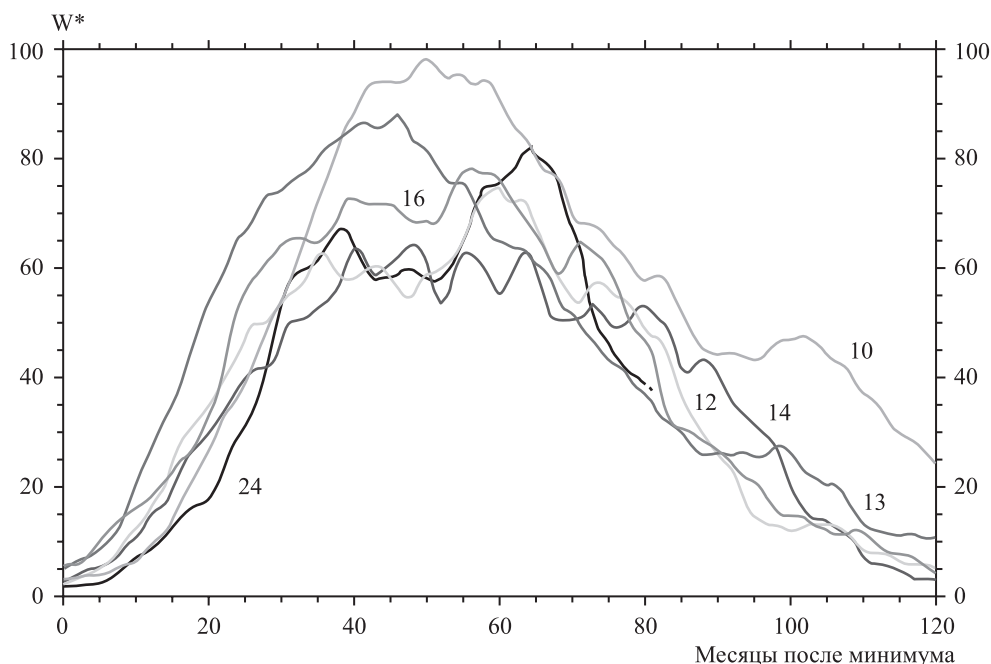
в апреле – мае 2016 г.

Солнечная пятнообразовательная активность в последние месяцы весны 2016 г. была низкой всю первую декаду апреля и стала очень медленно возрастать, достигнув средних значений и до конца периода его сохраняя (иногда, на короткое время, опускаясь до низкого). Число групп пятен на видимом диске Солнца менялось от 1 до 7. Все они были небольшими и спокойными; однако две группы пятен были большими:

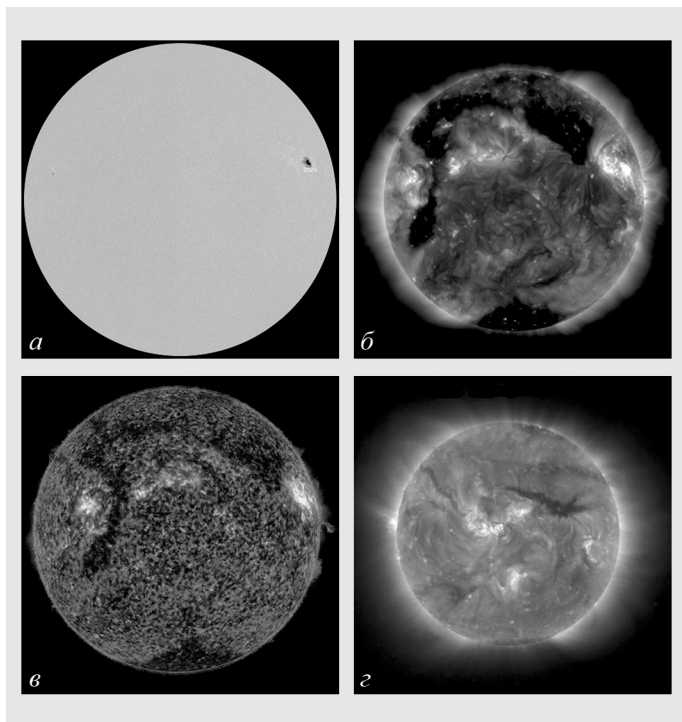
одна появилась в Северном полушарии и одна в Южном. Из 22 групп солнечных пятен 15 появились в Северном полушарии. Кривая роста сглаженных за год значений относительного числа пятен продолжает уверенно идти на спад. Текущие среднемесячные значения чисел Вольфа (мы, как и Служба состояния околоземного пространства – www.swpc.noaa.gov – будем придерживаться старой, классической системы) составляют $W_{\text{апр.}} = 32,9$ и $W_{\text{май}} = 31,3$. Сглаженное значение этих индексов в октябре и ноябре 2015 г. составило $W^* = 39,6$ и $W^* = 36,8$ соответственно.

В первую декаду **апреля** пятнообразовательная активность была на низком

уровне, с 1 по 3 апреля наблюдались минимальные ежедневные значения относительных чисел солнечных пятен ($W = 7$), а максимальное – **28 апреля** ($W = 54$). Вспышечная активность была на низком и очень низком уровнях практически весь месяц, и только 18 апреля в большой группе Северного полушария, ближе к западному лимбу, произошла одиночная большая солнечная вспышка рентгеновского балла M6.7/1F. Это вспышечное событие сопровождалось распространением ударной волны (радиовсплеск II типа) и корональным выбросом вещества, а в околоземном космическом пространстве была отмечена малая магнитная буря. Вы-

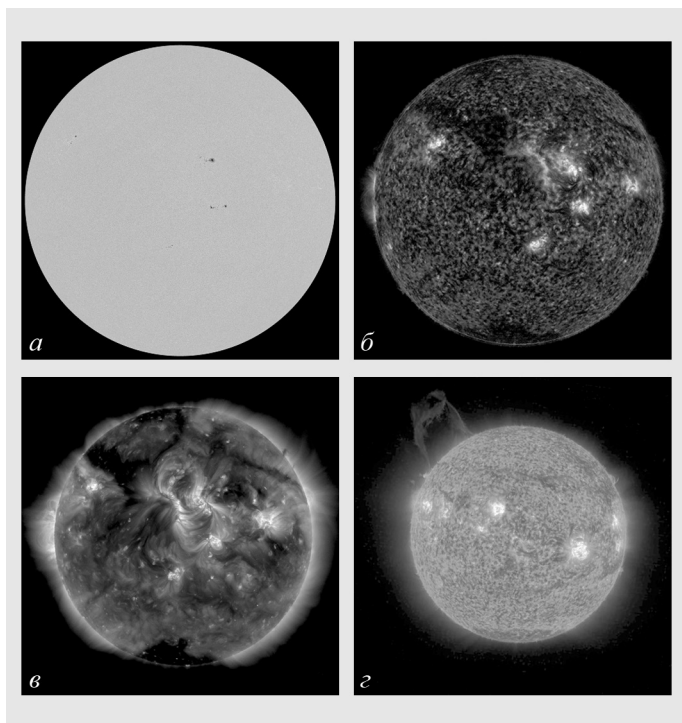


Ход развития (81 месяца) текущего 24-го цикла солнечной активности среди всех достоверных (с 1849 г.) солнечных циклов. W^* – сглаженные за 13 месяцев относительные числа солнечных пятен в старой, классической системе.



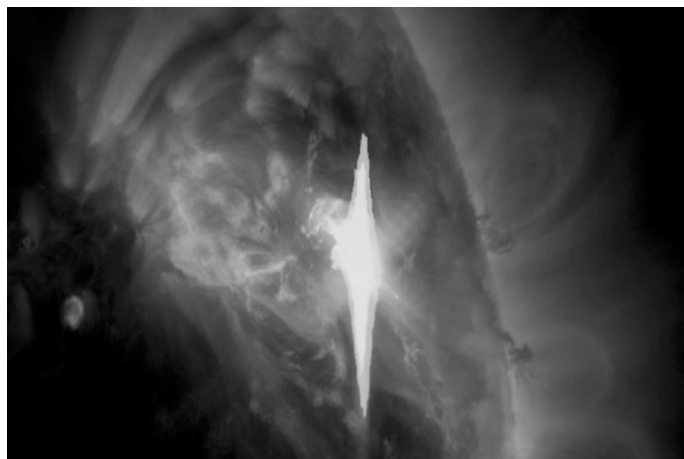
Солнце 14 апреля 2016 г.:
 а – фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$);
 б – в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$);
 в – в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 193 \text{ \AA}$);
 г – в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 193 \text{ \AA}$, обратная сторона Солнца). Космические солнечные обсерватории “SDO” и “STEREO-A” (<http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>).

бросы солнечных волокон (19 событий) наблюдались 1, 4, 8, 9, 10 (2), 13, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23 (2), 24, 26 и 27 (2) апреля. Коронोगрафы космической обсерватории “SOHO” зарегистрировали 89 корональных выбросов вещества разной интенсивности, среди которых один был типа “частичное гало III” (угол раствора 180° – 270°) и шесть были типа “частичное гало II” (угол раствора 90° – 180°). Три рекуррентных и шесть новых корональных дыр прошли по видимому диску Солнца, высокоскоростные потоки от трех из них внесли определенный “вклад” в магнитные бури. На средних широтах Земли отмечены четыре малых магнитных бури: 2–3, 13–14, 16–17



Солнце 11 мая 2016 г.:
 а – фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$);
 б – в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$);
 в – в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 195 \text{ \AA}$);
 г – в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$, обратная сторона Солнца). Космические солнечные обсерватории “SDO” и “STEREO-A” (<http://spaceweather.com>).

Единственная большая солнечная вспышка рентгеновского класса M6. Комбинированный снимок сделан 18 апреля 2016 г. в трех линиях крайнего ультрафиолета Fe XIV ($\lambda = 211 \text{ \AA}$), Fe XII ($\lambda = 193 \text{ \AA}$) и Fe IX ($\lambda = 171 \text{ \AA}$) космической солнечной обсерваторией “SDO” (<http://www.solarmonitor.org/>).



и 22 апреля. В апреле наблюдалось 8 сут с возмущенной геомагнитной остановкой. На геостационарных орбитах 4–7 и 13–17 апреля зарегистрирован очень высокий поток (более 10^7 частиц/м³) релятивистских электронов с энергиями больше 2 МэВ.

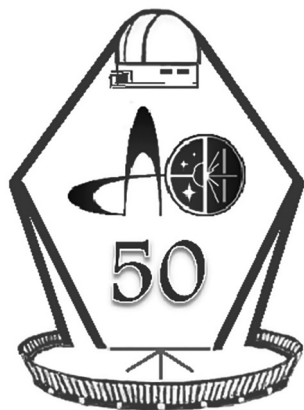
До **18 мая** уровень пятнообразовательной активности Солнца оставался средним. Низкий уровень отмечен лишь 18 мая и во всей третьей и четвертой декадах мая. На видимом диске Солнца наблюдалось от 5 до 1 групп солнечных пятен, причем одна в Южном полушарии была большой и спокойной. В Северном полушарии расположились 4 группы и 4 – в Южном. Максимальное наблюдаемое число солнечных пятен отмечено **14 мая** ($W = 54$), минимальное – 23 мая ($W = 10$). Вспышечная активность весь месяц была на очень низком уровне, кроме 7 сут, когда он повышался. Выбросы солнечных

волокон (26 события) наблюдались 3, 5, 6, 7 (5), 10 (4), 11 (3), 12, 13 (2), 15, 20 (2), 21, 22, 24 (2) и 26 мая. Корonoграфы космической обсерватории “SOHO” зарегистрировали больше 63 корональных выбросов вещества разной интенсивности, среди которых один был типа “частичное гало II” (угол раствора 90° – 180°). В мае наблюдались три рекуррентных корональных дыры и одна новая. В геомагнитном поле отмечена большая магнитная буря 8–9 мая, которая произошла из-за прохождения Земли сквозь высокоскоростной поток от корональной дыры Южного полушария Солнца и неожиданно сильной ударной волны на границе двух секторов межпланетного магнитного поля. Умеренная магнитная буря 1–2 мая стала следствием прихода возмущения от выброса солнечного волокна 27 апреля, совпавшего с прохождением Земли через вы-

сокоскоростной поток от корональной дыры Северного полушария Солнца. Малая магнитная буря 2–3 мая возникла вследствие влияния высокоскоростного потока от корональной дыры. Всего за месяц было отмечено 6 сут с возмущенной геомагнитной остановкой. В околоземном космическом пространстве было отмечено одно малое протонное событие 15–16 мая. На геостационарных орбитах очень высокий поток релятивистских электронов с энергиями больше 2 МэВ наблюдался 3–6, 9–17 и 20 мая.

Текущее состояние солнечной активности и ее прогноз на русском языке можно найти в Интернете (<http://www.izmiran.ru/services/saf/>). Страница обновляется каждый понедельник.

*В.Н. Ишков
ИЗМИРАН,
ГЦ РАН*



Юрий Николаевич Парийский

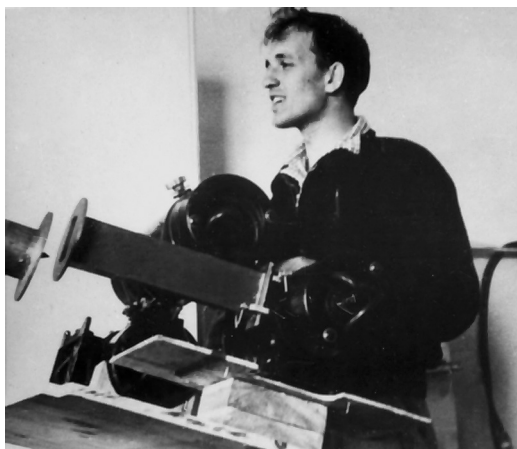
Юрий Николаевич Парийский родился 23 мая 1932 г. в Москве в семье известного ученого – геофизика и астронома, члена-корреспондента АН СССР Николая Николаевича Парийского и Лидии Викторовны Парийской, работавшей в теоретическом отделе ФИАН. Основные труды отца Юрия Николаевича в области астрономии посвящены космогонии, вопросам вращения Зем-

ли, природе солнечной короны; в области геофизики – изучению приливных деформаций Земли, гравиметрии. Ближайшее окружение семьи Парийских состояло из известных советских ученых, среди них – лауреат Нобелевской премии И.Е. Тамм, академики М.А. Леонтович, П.С. Новиков, А.А. Андронов, Л.В. Келдыш. Возможно, научная среда и круг общения родителей, где рос Юрий Николаевич (особенное влияние на него оказал И.Е. Тамм) определила его будущую профессию.

В 1955 г. Юрий Николаевич окончил механико-математический факультет МГУ по специальности астрономия. На последних курсах оказался в числе первых слушателей лекций И.С. Шкловского по радиоастрономии, принимал участие в правке монографии “Космическое радиоизлучение” своего учителя. В 1955 г. получил распределение в Пулковскую обсерваторию (Ленинград) в только что организованный отдел “Радиоастрономия”, которым руководил доктор физико-математических наук С.Э. Хайкин. Работая в Пулковской обсерватории (1955–1969), Юрий Николаевич принимал активное участие в строительстве Большого Пулковского радиотелескопа (БПР), в первых наблюдениях радиоисточников и получил много интересных результатов. При проведении высокоточных наблюдений в области космологии Юрий Николаевич с группой установил высокую степень анизотропии реликто-



Академик Ю.Н. Парийский, 2010 г.



Ю.Н. Парийский у одного из первых радиометров континуума РАТАН-600. 1957 г.

вого фона, что привело к пересмотру теории образования галактик; изучил тонкую структуру Галактики и создал морфологический каталог ее радиоисточников, рассмотрел вопросы эволюции радиоисточников. (Наблюдения в этой области астрономам-оптикам недоступны, так как центр нашей Галактики покрывает плотное межзвездное облако, поглощающее проходящий через него свет звезд на 9^m .) В радиодиапазоне даже столь плотная темная материя прозрачна, что дало возможность измерить температуру ионизованного газа в ее центре, оказавшейся равной 10 000 K, и исследовать некоторые подробности в структуре центра. Обнаружено, что яркое плотное газовое ядро нашей Галактики размером в 6 пк (19,56 св. лет) погружено в оболочку не теплового излучения. Галактический центр наблюдался сквозь группу газовых туманностей, находящихся в одном из ее рукавов и скрытых поглощающей материей. Это вызвало большой интерес не только в астрономическом мире, но и среди многочисленных журналистов, сообщавших, что сотрудник Пулковской обсерватории Ю.Н. Парийский открыл в центре Галактики “пылающий костер”.

В 1962 г. под руководством Юрия Николаевича на Большом Пулковском телескопе выполнены наблюдения Венеры и Юпитера. Ученым предстояло выяснить: откуда исходит наблюдаемое радиоизлучение Венеры на волне 3 см, которому соответствует температура 600 K? Установлено, что радиояркость к краю диска Венеры уменьшается, а это говорит о том, что наблюдаемое радиоизлучение исходит из плотной горячей поверхности планеты и частично поглощается ее атмосферой. Эти данные через несколько месяцев подтвердила американская АМС “Маринер-2” во время полета вблизи Венеры.

Ю.Н. Парийским, Н.С. Соболевой и В.Я. Гольневым сделаны новые выводы о расположении поясов радиации около Юпитера и о возможной причине их возникновения. Авторы объясняли это действием на магнитосферу Юпитера солнечного ветра, а также исхо-



Закрепляют регулировочные винты для корректировки формы поверхности. Ю.Н. Парийский и ведущий конструктор А.И. Копылов. 1973 г.



Осмотр предполагаемого места строительства радиотелескопа РАТАН-600. В центре – секретарь Отделения общей физики и астрономии АН СССР академик Л.А. Арцимович, Президент АН СССР М.В. Келдыш и Ю.Н. Парийский. Начало 1970-х гг.

дящего от Солнца корпускулярного потока частиц.

В 1960 г. Юрий Николаевич стал руководителем отдела радиоастрономии, в 1962 г. защитил кандидатскую диссертацию под руководством С.Э. Хайкина на тему “Исследование некоторых радиотуманностей по их непрерывному радиоизлучению”.

Ю.Н. Парийский увлеченно занимался методами строительства больших радиотелескопов, он – соавтор и участник многих проектов (РАТАН-600, проект “КВАЗАР КВО”, проект международного радиотелескопа площадью зеркала 5 км² и с разрешением 1 с дуги). Ученый детально исследовал антенны перемен-

ного профиля, показал возможность объединения отдельных антенн в единую фазоустойчивую систему и возможность синтеза изображения при ограниченном количестве антенн с использованием вращения Земли. Им изучены ограничения разрешающей силы радиотелескопов, определяемые условиями распространения радиоволн в земной атмосфере и в космической среде, а также пространственными флуктуациями фона метagalактических источников.

Юрий Николаевич – один из создателей радиотелескопа РАТАН-600. В 1965 г. по решению АН СССР он стал “ответственным ученым” по объекту РАТАН-600. На его сооружение Ю.Н. Па-



Общий вид стройки РАТАН-600 и других строений, 1970-е гг.

рийский потратил много сил и времени. Первые наблюдения самого большого в мире рефлекторного радиотелескопа проведены 12 июля 1974 г., что стало выдающимся достижением не только в советской, но и в мировой науке.

В 1969 г. Ю.Н. Парийский защитил докторскую диссертацию на тему «Результаты исследования одномерных изображений ярких радиоисточников в Пулкове и перспективы двумерной и трехмерной радиоастрономии». В этом же году он стал заместителем директора по научной работе в Специальной астрофизической обсерватории АН СССР.

В 1979 г. Юрия Николаевича избрали членом-корреспондентом АН СССР, в 1992 г. — действительным членом РАН.

Под руководством ученого на радиотелескопе РАТАН-600 проводилось много значимых в научном мире программ: состоялись две сложные долговременные программы — «Холод» (1979–1983)

и «Генетический код Вселенной» (1998–2014). В рамках эксперимента «Холод» при активном участии Н.С. Соболевой и группы наблюдателей создан каталог объектов сантиметрового диапазона (RC-каталог). В него вошло более 100 объектов — кандидатов в сверхмассивные черные дыры. Для их изучения разработана программа «Большое Трио» (БТА — РАТАН-600 — VLA), в ее рамках впервые обнаружена одна из самых далеких радиогалактик во Вселенной RCJ0311 + 0507 с красным смещением $z = 4,514$. Этот объект уникален. Считается, что в центре родительской галактики существует гигантская черная дыра массой более $10^{10} M_{\odot}$. Возраст звездного населения родительской галактики оценен в 800 млн лет.

Начиная с 1990-х гг., Юрий Николаевич ведет большую научную и организационную работу по международному проекту «Генетический код Вселенной», цель которого — исследование ани-

зотропии космического фонового излучения, возникшего на ранней стадии развития Вселенной и определившего ее эволюцию и структуру современного мира. Оценен вклад синхротронного, свободно-свободного и пылевого излучения в фоновое излучение неба; получен каталог радиоисточников зенитного обзора ПАТАН-600 (RZF-каталог). Для накопления многолетних данных о микроволновом излучении создана шестнадцатиканальная (32 входа) матричная радиометрическая система «МАРС-3».

Ю.Н. Парийский – автор более 250 статей и двух монографий: «Радиотелескопы и радиометры» (соавторы – Н.А. Есепкина, Д.В. Корольков, Ю.Н. Парийский, 1973) и «Радиогалактики и космология» (соавтор – О.В. Верхованов, 2009). Под его руководством за последние 15 лет

защищены 6 работ на соискание ученой степени кандидата наук.

В настоящее время Юрий Николаевич – главный научный сотрудник Специальной астрофизической обсерватории РАН, член Совета по радиоастрономии в нашей стране и член Международного астрономического совета (IAU). Он избирался президентом комиссии № 40 МАС по радиоастрономии, президентом комиссии по радиоастрономии Радиосоюза (URSI).

За огромный вклад в развитие радиоастрономии в стране и плодотворную научную деятельность ученый награжден медалью «За доблестный труд» (1970 г.), орденом «Знак Почета» (1975 г.), орденом Ленина (1978 г.), орденом «За заслуги перед отечеством» IV степени (1999 г.).

Ю.Н. Парийского сотрудники САО РАН считают одним из главных наставников, к которому можно обратиться в любую



На территории радиотелескопа ПАТАН-600. Академик Ю.Н. Парийский, ведущий научный сотрудник А.Б. Берлин, главный конструктор О.Н. Шиврис. Станция Зеленчукская, 1985 г.



Ведущий научный сотрудник Н.С. Соболева, академик Ю.Н. Парийский, заслуженный деятель науки и техники РФ профессор Н.А. Есепкина. САО АН СССР, 1985 г.



Семья Парийских: внуки – Лев, Даня, Таня, Кеша и Лида; дети – Екатерина и Алёна; Н.С. Соболева и Ю.Н. Парийский. Сестро-рецк, 2010 г.



Ю.Н. Парийский и Н.С. Соболева. Пос. Архыз, заповедник Кызгыч, 2009 г.

минуту и рассчитывать на его помощь и понимание. Он воспитал не одно поколение радиоастрономов для работы на РАТАН-600.

Свою судьбу Юрий Николаевич неразрывно связал с Натальей Сергеевной Соболевой, которая была не только женой Юрия Николаевича, но и другом, сотрудником, соавтором и участником многих новых научных направле-

ний; самым активным наблюдателем на РАТАН-600. У них родились две дочери – Алена и Екатерина, которые подарили родителям пять внуков. Даже сегодня, когда уже нет Натальи Сергеевны, можно только позавидовать созданному ими и сохраненному в семейном очаге теплу. В семье проводятся творческие вечера, где счастливый, окруженный любовью и заботой дочерей, внуков и друзей Юрий Николаевич распевает песни. Алена и Катя Парийские практически выросли “на работе” родителей, когда те вели наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600. Они вспоминают о времени строительства радиотелескопа и о своей жизни в семье первых радиоастрономов страны с добротой и улыбкой.

Большую часть жизни Юрий Николаевич посвятил телескопу РАТАН-600, внес огромный вклад в развитие радиоастрономии, стал наставником и учителем для многих из сотрудников. Мы благодарны ему за это...

*Т.А. СЕМЁНОВА,
кандидат физико-математических наук
А.В. ТЕМИРОВА,
кандидат физико-математических наук
САО РАН*

Иосиф Самуилович Шкловский

(К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

Прошедший век в астрономии можно по праву назвать веком астрофизики. Рожденная в XX веке, астрофизика быстро вышла на передний край астрономии; в астрофизике работали многие крупные ученые, физики и астрономы. Среди этой плеяды выдающихся уче-

ных Иосиф Самуилович Шкловский – один из наиболее блестящих астрофизиков внесший в нее неоценимый вклад. Его авторитет среди специалистов во всем мире очень высок. Благодаря своим ярким популярным статьям, книгам и философским работам, он был известен также и широкой общественности. Круг научных интересов И.С. Шкловского охватывает почти все сферы современной астрофизики, включая физику планетных атмосфер, Солнца, звезд, межзвездной среды, космических лучей, галактик; проблемы космогонии и космологии, а также поисков жизни во Вселенной. Он создал мощную научную школу. Его ученики – академики Н.С. Кардашёв и Ю.Н. Парийский, член-корреспондент В.И. Слыш, профессора В.И. Мороз, Т.А. Лозинская, В.Г. Курт, П.В. Щеглов.

И.С. Шкловский родился 1 июля 1916 г. в г. Глухове (Украина). В 1931 г. окончил школу-семилетку в г. Акмолинске (ныне Астана, Казахстан) и два года проработал десятником на строительстве железных дорог в Сибири. В 1933 г. поступил на физико-математический факультет Дальневосточного университета во Владивостоке, в 1935 г. перевелся на физико-математический факультет МГУ, который окончил с отличием в 1938 г. по специальности физик-оптик. На физмате он учился на одном курсе с будущим лауреатом Нобелевской премии академиком



И.С. Шкловский. 1970-е гг.



В студенческие годы. 1937 г.

В.Л. Гинзбург (Земля и Вселенная, 2004, № 2). По окончании университета Иосиф Самуилович поступил в аспирантуру ГАИШ МГУ, а после ее окончания был зачислен в институт старшим лаборантом. В 1944 г. он защитил кандидатскую диссертацию, а спустя 5 лет – докторскую. В то время ему исполнилось 33 года, коллеги стали шутливо называть его “доктор”. Это “имя” закрепилось за ним на всю жизнь и сохранялось даже тогда, когда он уже стал маститым ученым, а среди его учеников появились доктора, профессора и академики.

СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА

До середины 1940-х гг. научные интересы И.С. Шкловского были связаны с классическими проблемами астрофизики, главным образом, со спектроскопией и физикой солнечной короны. Его кандидатская диссертация, выполненная под руководством Николая Николаевича Парийского, была посвящена проблеме электронной температуры в астрофизике. Развивая эти идеи, он создал теорию ионизации солнечной короны, что стало предметом его док-

торской диссертации. Первые радиоастрономические работы Иосифа Самуиловича выполнены им во второй половине 1940-х гг. – когда стали известны результаты наблюдений радиоизлучения Солнца и нашей Галактики, выполненные в ряде стран в период Второй мировой войны. Исследуя механизм радиоизлучения Солнца, он показал, что оно содержит две составляющие, имеющие совершенно разную природу – тепловое радиоизлучение спокойного Солнца и спорадическое радиоизлучение, связанное с плазменными колебаниями. Его работы, наряду с исследованиями В.Л. Гинзбурга и Д. Мартина, позволили построить изотермическую модель солнечной атмосферы, которая и в настоящее время лежит в основе теории радиоизлучения спокойного Солнца. С учетом этой модели



Автопортрет. Начало 1940-х гг.

был сделан фундаментальный вывод о том, что источником радиоизлучения Солнца является не фотосфера, а внешние слои его атмосферы – хромосфера и корона. Этот вывод блестяще подтвердился при наблюдении солнечного затмения 20 мая 1947 г. Для наблюдения затмения Академия наук СССР организовала специальную экспедицию в Бразилию на пароходе “Грибоедов”. И.С. Шкловский принимал в ней участие. С момента окончания Великой Отечественной войны прошло всего два года, многие города еще лежали в руинах, надо было восстанавливать разрушенное войной народное хозяйство. И в этих условиях советское правительство сочло возможным организовать такую дорогостоящую экспедицию; отношение к науке в то время было не таким, как сейчас.

Теория радиоизлучения солнечной короны разрабатывалась И.С. Шкловским в тесной связи с проблемами оптической спектроскопии короны. Это привело к созданию теории ионизации солнечной короны и обоснованию современных представлений о горячей короне. В настоящее время эти представления кажутся совершенно очевидными, но в начале 1950-х гг. их приходилось отстаивать в очень упорной борьбе со сторонниками теории холодной короны. Эти результаты Шкловский обобщил в монографии “Солнечная корона”, вышедшей в 1951 г. На основе созданной им теории ионизации, он указал на существование мощного ультрафиолетового и рентгеновского излучения короны, которое вызывает ионизацию нижней ионосферы Земли. Эти выводы, сделанные почти за 10 лет до ракетных и спутниковых наблюдений, впоследствии блестяще подтвердились.

РАДИОАСТРОНОМИЯ

В конце 1940-х – начале 1950-х гг. радиоастрономия только зарождалась. Иосиф Самуилович активно включился в исследования в этой новой области.

Он не ограничился изучением радиоизлучения Солнца, фундаментальные результаты он получил в галактической радиоастрономии. В 1948 г., после того, как из публикаций стала известна идея ван де Хюлста о наблюдении радиолинии водорода на волне 21 см, И.С. Шкловский произвел необходимые расчеты вероятности перехода этой линии и ее ожидаемой интенсивности. Он показал, что обнаружение линии вполне возможно имевшимися в то время средствами. В 1951 г. она, действительно, была обнаружена практически одновременно в США, Англии и Австралии. Обнаружение радиолинии водорода – самого распространенного элемента во Вселенной, дало в руки астрономов мощное средство исследования структуры и кинематики Галактики. В последующие несколько лет (1948–1953 гг.) Иосиф Самуилович выполнил ряд работ, в которых заложил основы радиоспектроскопии Галактики. Он рассчитал частоту и интенсивность радиолинии гидроксила ($\lambda = 18$ см), которая была обнаружена спустя почти 10 лет в 1963 г. Одновременно он рассчитал частоту радиолинии молекулы CN на длине волны 9,46 см, которая была обнаружена только в 1973 г. Вскоре после ее обнаружения начался бурный расцвет молекулярной астро- радиоспектроскопии, превратившейся в одно из важнейших направлений радиоастрономии. Особое значение имело обнаружение радиолиний гидроксила. Вначале они, как и предполагалось, были обнаружены в поглощении, но спустя два года на этих частотах найдены очень узкие интенсивные линии излучения. Природу их не сразу поняли, предполагалось даже, что они могут быть связаны с некоей неизвестной субстанцией “мистериумом”. Затем выяснилось, что они действительно излучаются молекулами гидроксила OH, а их необычные свойства объясняются лазерным механизмом излучения, т.е. излучением того же типа, что реализуется в квантовых генераторах – лазерах.

И.С. Шкловский внес вклад в понимание природы этих линий. Он также обратил внимание на то, что источники мазерного излучения находятся в областях, где происходит процесс звездообразования. По этому поводу он образно заметил: “новорожденная звезда оповещает о своем рождении всю Галактику, пользуясь новейшей техникой квантовой радиофизики”. В последующие годы в межзвездной среде были открыты десятки радиолиний (в том числе линии органических соединений), что весьма важно для астробиологии.

В 1952 г. Иосиф Самуилович предсказал существование сферической составляющей радиоизлучения Галактики, образующей галактическую корону. Детально теория радиокороны Галактики была развита им и С.Б. Пикельнером в 1957 г. (Земля и Вселенная, 1976, № 2; 1991, № 4). Открытие радиокороны сыграло важную роль в понимании механизма нетеплового радиоизлучения Галактики.

Начиная с 1953 г., И.С. Шкловский активно включился в развитие теории синхротронного излучения, сосредоточив свои усилия на астрономических приложениях синхротронного механизма; он впервые правильно оценил полную энергию релятивистских частиц и магнитных полей в радиогалактиках. Следующий шаг связан с проблемой происхождения космических лучей. Шкловский применил синхротронную теорию для оценки энергетике остатков вспышек сверхновых, показав, что при каждой вспышке образуются релятивистские частицы с суммарной энергией около 10^{48} эрг. Для оценки эффективности этого процесса в образовании космических лучей надо было знать частоту вспышек сверхновых в Галактике. Как раз к этому времени относится его увлечение историческими хрониками, в которых упоминается о вспышках сверхновых. Он – первый из радиоастрономов обратил внимание на ряд вспышек (например, Сверхновая 185 г. н.э. в созвездии Центавра, Сверхновая 1006 г.



И.С. Шкловский. 1950-е гг.

в созвездии Волка) и предложил искать на месте этих сверхновых радиоисточники, которые впоследствии были там обнаружены. В 1960 г. Шкловский опубликовал свою знаменитую работу о радиоисточнике Кассиопея А. Этот самый мощный источник радиоизлучения – остаток сверхновой, вспыхнувшей в XVII в. (Земля и Вселенная, 1981, №№ 4 и 5; 2008, № 1). На основе теории синхротронного излучения Иосиф Самуилович предсказал, что, благодаря расширению оболочки сверхновой, поток радиоизлучения должен меняться на 1,9% в год. Уже в следующем году его предсказание блестяще подтвердилось наблюдениями. Один из учеников Иосифа Самуиловича член корр. РАН В.И. Слыш (Земля и Вселенная, 2009, № 1) считает эту работу лучшей рабо-

той И.С. Шкловского. Правда, Иосиф Самуилович, кажется, придавал особое значение своей работе по планетарным туманностям. В дальнейшем развитая им теория векового изменения потока радиоисточников была успешно применена к другим остаткам сверхновых, а также к квазарам и к активным ядрам галактик.

Привлечение данных о вспышках сверхновых, отмеченных в исторических хрониках, позволило И.С. Шкловскому повысить почти на порядок принятую ранее оценку частоты их вспышек. Оказалось, что вспышки сверхновых полностью компенсируют убыль энергии космических лучей за счет ядерных столкновений. Так возникла “радиоастрономическая” теория происхождения космических лучей.

К этому же периоду относится очень важное его исследование природы излучения Крабовидной туманности (M1, NGC 1952). В начале 1953 г. он объяснил радиоизлучение Крабовидной туманности на основе синхротронного механизма (Земля и Вселенная, 1982, № 3; 2012, № 5). Однако природа оптического излучения все еще оставалась неясной. И.С. Шкловский подошел к этой проблеме с совершенно неожиданной стороны: если нельзя считать радиоизлучение Крабовидной туманности продолжением его оптического спектра, природа которого связывалась с тепловым механизмом, то нельзя ли, напротив, считать оптический континуум туманности продолжением синхротронного излучения из радиодиапазона в оптическую область спектра? Расчеты полностью подтвердили эту догадку. Таким образом, им впервые была развита концепция единого механизма излучения от оптического диапазона до радиодиапазона. Исследование И.С. Шкловским природы Крабовидной туманности послужило толчком для широкого применения синхротронного механизма к другим объектам.

В 1953 г. вышла книга И.С. Шкловского “Радиоастрономия” (Гостехиз-

дат, 1953). Хотя формально она считалась научно-популярной, но в ней на высоком научном уровне излагались основные методы и достижения радиоастрономии. Книга стала незаменимым пособием для многих начинающих радиоастрономов. В 1956 г. опубликована его монография “Космическое радиоизлучение”. В 1953–1954 гг. Иосиф Самуилович прочел первый в нашей стране и, по-видимому, первый в мире курс по радиоастрономии на астрономическом отделении МГУ. Слушателями его, наряду со студентами, стали и научные сотрудники ряда учреждений Москвы, начинающие заниматься радиоастрономией. На астрономическом отделении также начал работать учебный семинар по радиоастрономии под руководством И.С. Шкловского и А.Е. Саломоновича (Шкловский вел теоретическую, астрофизическую часть семинара, Саломонович – экспериментальную, радиотехническую). Этот семинар, в работе которого принимали участие радиофизики и астрономы, стал хорошей школой и для тех, и для других. Среди первых участников семинара – такие известные ныне радиоастрономы, как Ю.Н. Парийский, Н.С. Кардашёв, Н.С. Соболева. Таким образом, в ГАИШ МГУ была создана почва для серьезного развития радиоастрономических исследований. В 1953 г. в ГАИШ создан отдел радиоастрономии под руководством И.С. Шкловского. Будучи теоретиком, он считал необходимым развивать, прежде всего, экспериментальные исследования. С этой целью в отделе радиоастрономии была создана инженерная группа и начата разработка радиоастрономической аппаратуры. Шкловский хорошо понимал необходимость исследования астрономических объектов во всех диапазонах электромагнитных волн. Только такой подход, по его мнению, давал возможность построить надежную модель объекта и получить окончательный ответ на вопрос “что это такое?”. Поэтому, наряду с радиоастрономическими ис-

следованиями, он с самого начала стал развивать в отделе исследования в оптическом и инфракрасном диапазонах, а позднее – в рентгеновском. То есть отдел с самого начала строился и развивался как отдел всеволновой астрономии. В 1969 г. часть сотрудников отдела радиоастрономии ГАИШ МГУ была переведена во вновь созданный отдел астрофизики ИКИ АН СССР, который также возглавил И.С. Шкловский.

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

После запуска в Советском Союзе первого искусственного спутника Земли Иосиф Самуилович активно включился в программу космических исследований. Он хорошо понимал, что только с помощью космических средств астрономия действительно может стать всеволновой. И.С. Шкловский установил контакт с С.П. Королёвым и принимал участие в подготовке многих экспериментов. Его роль высоко ценили Мстислав Всеволодович Келдыш и Сергей Павлович Королёв. Для определения местоположения космических аппаратов Иосиф Самуилович предложил остроумный эксперимент “искусственная комета”. 3 января 1959 г. на расстоянии 113 тыс. км от Земли с борта АМС “Луна-1” было выпущено облако натрия, которое наблюдалось с Земли. В лучах Солнца облако ярко светилось за счет флуоресценции в желтой линии натрия (Земля и Вселенная, 2009, № 4). Первоначально эксперимент планировался с целью определения местоположения космических аппаратов, а в дальнейшем использовался для изучения земной атмосферы и межпланетной среды. За этот эксперимент И.С. Шкловский удостоен Ленинской премии.

Начиная с 1956 г., отдел Шкловского в ГАИШ МГУ приступает к астрономическим наблюдениям за пределами земной атмосферы – сначала с помощью ракет, а затем искусственных спутников Земли и автоматических межпланетных станций. Важные результаты



И.С. Шкловский – лауреат Ленинской премии. 1960 г.

были получены в области внеатмосферной астрономии (В.Г. Курт) и в изучении планет (В.И. Мороз). Начинает развиваться космическая радиоастрономия (Н.С. Кардашёв, В.И. Слыш). К этому же времени относится интерес Иосифа Самуиловича к рентгеновской астрономии, где им получены фундаментальные результаты. В дальнейшем космические исследования развивались его учениками в отделе астрофизики ИКИ АН СССР и в Астрокосмическом центре ФИАН. При этом И.С. Шкловский всегда подчеркивал, что космические исследования должны развиваться в органическом единстве с наземными наблюдениями, которыми в отделе занимались его ученики – В.Ф. Есипов, Т.А. Лозинская, А.Э. Наджип, О.Г. Таранова, П.В. Щеглов.

В 1979 г. в СССР запущен первый космический радиотелескоп KPT-10 (ру-



Г.Б. Шоломицкий, И.С. Шкловский и Н.С. Кардашёв. ГАИШ МГУ, 1965 г.

ководитель эксперимента Н.С. Кардашёв). Планировалось, что подобный же радиотелескоп должен войти в состав наземно-космического радиоинтерферометра с высокой угловой разрешающей способностью (Земля и Вселенная 1990, № 4, с. 26–31). Реализация этого проекта, проводимого при активной поддержке И.С. Шкловского, прервалась после распада Советского Союза. Но работы в этом направлении не прекращались, и в 2011 г. они увенчались успешным запуском космического радиотелескопа-интерферометра “Радио-астрон” (Земля и Вселенная, 2011, № 6; 2012, № 6).

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД И ВНЕГАЛАКТИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

Значительное место в творчестве И.С. Шкловского занимает проблема эволюции звезд. Его перу принадлежит монография “Сверхновые звезды” (1966 г.) и прекрасная научно-популяр-

ная книга “Звезды: их рождение, жизнь и смерть” (1975 г.). Работая над проблемами звездной эволюции, он пришел к выводу, что планетарные туманности являются определенным этапом в эволюции красных гигантов. Оболочка, “сброшенная” красным гигантом, превращается в планетарную туманность, а оставшееся ядро эволюционирует в белого карлика. На основе этих представлений Шкловский разработал новый метод определения расстояний до планетарных туманностей.

С началом наблюдений в рентгеновской области спектра Иосиф Самуилович активно включился в исследования в этой области. Он – один из пионеров рентгеновской астрономии. В его отделе в ИКИ АН СССР и ГАИШ МГУ рентгеновскими исследованиями занимались В.Г. Курт и Е.К. Шеффер. Иосиф Самуилович одним из первых понял связь между дискретными рентгеновскими источниками и компактными объекта-

ми – нейтронными звездами и черными дырами.

В области внегалактической астрономии И.С. Шкловский занимался исследованием природы радиогалактик, сейфертовскими галактиками и квазарами, активными ядрами галактик, природой выбросов из ядер галактик. Трудно найти какую-то область астрофизики, где бы он не приложил свои силы и не внес заметный вклад в изучение вновь открываемых объектов. Когда было открыто реликтовое излучение, Шкловский объяснил аномальную заселенность энергетических уровней молекулы CN в межзвездной среде воздействием этого излучения на молекулы, что помогло разобраться в природе реликтового излучения. Кстати, термин “реликтовое излучение” принадлежит И.С. Шкловскому. Одна из ближайших его сотрудниц – Надежда Федоровна Слепцова – в своих воспоминаниях отметила, что писать и говорить о таком ярком и необычном человеке, да еще кратко – невозможно. Действительно, невозможно перечислить все, что он сделал. Но нельзя не отметить одну область, в которую он внес неоценимый вклад, – проблема жизни во Вселенной и поиск внеземных цивилизаций.

ЖИЗНЬ ВО ВСЕЛЕННОЙ И ПОИСК ВНЕЗЕМНЫХ ЦИВИЛИЗАЦИЙ

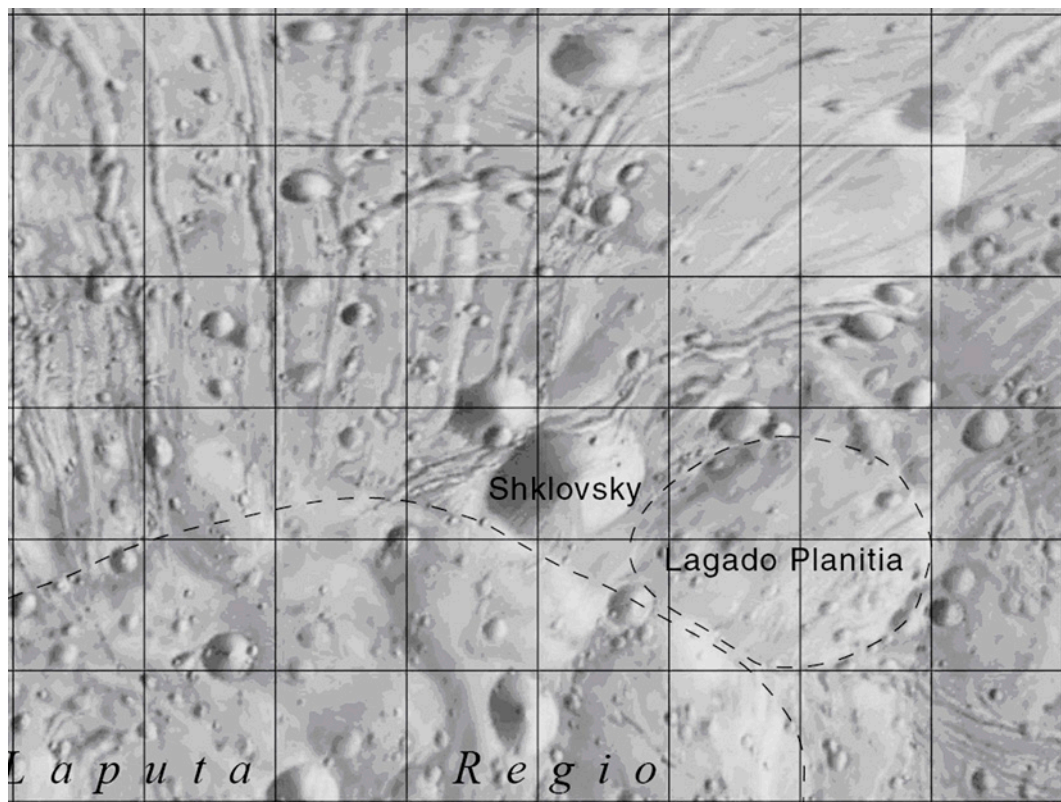
Выше мы уже упоминали об интересе И.С. Шкловского к сверхновым звездам. Привлечение данных о вспышках сверхновых, отмеченных в исторических хрониках, позволило ему почти на порядок повысить принятую ранее оценку частоты их вспышек. Естественно, возникал вопрос: а что будет, если сверхновая вспыхнет в близких окрестностях Солнечной системы? Иосиф Самуилович рассчитал интенсивность жесткого излучения на Земле при такой близкой вспышке; оказалось, что она достаточно велика и может служить мощным мутагенным фактором. Тогда и возникла идея о влиянии вспы-



Я.Б. Зельдович и И.С. Шкловский в кулуарах конференции. 1970-е гг.

шек сверхновых на эволюцию жизни на Земле. По существу, это была революционная идея, утверждающая, что жизнь на Земле тесно связана с условиями далекого Космоса, а не только с условиями нашей планеты или даже всей Солнечной системы, то есть, планетарная жизнь является фактором космического порядка. Опираясь на эти идеи, И.С. Шкловский совместно с В.И. Красовским в конце 1950-х гг. выдвинул гипотезу о том, что внезапная гибель динозавров могла быть связана со вспышкой Сверхновой.

Приблизительно в то же время, в 1958 г. Шкловский выдвигает парадоксальную гипотезу об искусственном происхождении спутников Марса. Впоследствии он признал ее несостоятельной, но в то время очень увлекался этой идеей. В дальнейшем Шкловский принимал участие в подготовке космических миссий к Фобосу с целью его детального изучения. В память об ученом, искавшем разгадку Фобоса, один из кратеров на его поверхности назван именем “Шкловский”. Заинтересовав-



Фрагмент карты спутника Марса Фобоса с кратером Шкловский, расположенным на Равнине Лагадия (Lagadio Planitia) в районе Лапута.

шись проблемой жизни во Вселенной, И.С. Шкловский с большим вниманием следил за новыми публикациями по этой проблеме. Поэтому когда в журнале "Nature" появилась статья Дж. Кокони и Ф. Моррисона о межзвездной радиосвязи, он моментально откликнулся на нее публикацией в 1960 г. в журнале "Природа" большой проблемной статьей "Возможна ли связь с разумными существами других планет?". Она легла в основу его знаменитой книги "Вселенная, жизнь, разум", первое издание которой вышло в свет в 1962 г. Надо сказать, что в то время поставить вопрос о серьезном научном изучении проблемы поиска внеземных цивилизаций было непросто. По меткому выражению Уолтера Салливана, это было самоубийственно в плане научной репута-

ции. И.С. Шкловский оказался в числе тех немногих ученых, которые не побоялись бросить вызов консервативному общественному мнению. Его высокий научный авторитет, безупречная научная репутация (как и свойственная ему сила убеждения) сыграли важную роль в том признании, которого сразу удалось добиться столь необычному научному направлению. Книга вызвала живейший интерес научной общественности и широких кругов читателей — ею зачитывались студенты, писатели, ученые. Высокую оценку книге дал тогдашний президент АН СССР Мстислав Всеволодович Келдыш. По влиянию на умы людей книгу И.С. Шкловского можно сравнить разве что с книгой К. Фламмарiona "О множественности обитаемых миров", которой зачитывалась вся об-

разованная Европа во второй половине XIX в. Но если в XIX в. обсуждение этой проблемы носило чисто умозрительный характер, то в середине XX в. ситуация коренным образом изменилась. Проблема получила серьезное естественнонаучное обоснование. На повестке дня встал вопрос о поиске внеземных цивилизаций. Книга Иосифа Самуиловича оказала серьезное влияние на развитие во всем мире исследований по проблеме жизни и разума во Вселенной и поиску внеземных цивилизаций. Ее сразу же перевели на многие иностранные языки. В СССР она выдержала шесть изданий, и последнее седьмое издание выпущено уже в России в 2006 г.

Вначале И.С. Шкловский относился к поискам внеземных цивилизаций с энтузиазмом. Однако постепенно его представления стали меняться. В 1976 г. он неожиданно для многих опубликовал в журнале "Вопросы философии" статью, в которой отстаивал тезис об уникальности нашей цивилизации. Твердо придерживаясь этой позиции, он подчеркивал, что речь идет не об абсолютной, а о практической уникальности, но эта оговорка не меняет сути дела. Важнее другое: придерживаясь концепции уникальности, Шкловский никогда не выступал против развертывания работ по поиску внеземных цивилизаций, а в личных беседах признавался, что радовался бы первым, если бы поиски увенчались успехом. Столь резкое изменение его взглядов, строго говоря, не было неожиданным. Уже в первых своих работах на эту тему Иосиф Самуилович подчеркивал преимущественность короткой шкалы жизни цивилизаций. Впоследствии он признал, что фатальной неизбежности короткой шкалы для всех цивилизаций не существует. Переосмыслив эту проблему, он начинает склоняться к мысли об уникальности нашей цивилизации. Но ведь короткая шкала тоже приводит к практической уникальности: цивилизаций много, но в данный момент времени вероятность встретить их невелика.



Обложка книги И.С. Шкловского "Вселенная, жизнь, разум" (2-е издание). 1965 г.



Выступление И.С. Шкловского на научном форуме. 1960-е гг.



Обложка сборника И.С. Шкловского “Эшелон”, выпущенного в 1991 г.

В последние годы жизни Шкловский выступил с еще более пессимистической концепцией о тупиковом пути нашей цивилизации, связанном с приобретением разума.

В чем причина глубоко пессимистического взгляда на проблему внеземных цивилизаций? Думается, разгадка лежит в характере его личности. Иосиф Самуилович – не только крупнейший астрофизик нашего времени, но и человек широко талантливый, разносторонне одаренный: он хорошо рисовал, прекрасно знал поэзию, мог без остановки наизусть читать стихи, обладал удивительным даром рассказчика, имел незаурядные литературные способности. О чем свидетельствуют его “невы-

думаные рассказы” и новеллы, собранные в сборнике “Эшелон” (1991). Но все это характеризует его не в полной мере. И.С. Шкловский обладал редким качеством – он был мыслитель. Он серьезно интересовался глобальными проблемами современности задолго до того, как появился и получил право гражданства сам этот термин. Он указывал на необходимость изучения закономерностей развития космических цивилизаций, подчеркивал, что проблема внеземных цивилизаций является, в первую очередь, проблемой социологической; ее нельзя подменять более узкой задачей связи, акцентируя внимание только на технических аспектах межзвездных коммуникаций. Как мыслителя И.С. Шкловского не удовлетворяла наивная вера некоторых исследователей в то, что достаточно построить большой радиотелескоп и вековая проблема установления связи с внеземным разумом будет решена; он называл такую точку зрения “подростковым оптимизмом”, и, похоже, она вызывала у него известное раздражение. Может быть, эта неудовлетворенность, внутренний протест против упрощенческого подхода к проблеме породил разочарование и тем самым сыграл определенную роль в эволюции его взглядов. Но не это главное. Иосиф Самуилович никогда не был безразличен к судьбе земной цивилизации. Остро ощущая противоречия современного мира, он пришел к ощущению крайнего пессимизма во всем, выражением которого и явилась идея об одиночестве нашей цивилизации, а позднее – о тупиковом пути, связанном с приобретением разума. Думается, это – трагедия крупного ученого и гражданина мира, который не мог смириться с тем, что творится на Земле, и в какой-то момент потерял светлую перспективу.

Были ли у И.С. Шкловского ошибки? Несомненно, и он никогда не скрывал этого, более того, он – считал, что у крупного ученого и ошибки будут значимые. Укажем на одно несбывшееся

предсказание Иосифа Самуиловича. В 1979 г. он опубликовал в журнале “Вопросы философии” статью под названием “Вторая революция в астрономии подходит к концу”. В ней И.С. Шкловский высказал мысль, что в результате двух революций в астрономии построение адекватной действительности астрономической картины мира близко к завершению. Остается лишь работа по ее детализации и уточнению, но эта работа не может коренным образом изменить “лица” астрономии, ибо “генеральный план” Вселенной и история ее развития в настоящее время полностью поняты и уже перешли в категорию абсолютных истин. Однако спустя всего 10–15 лет после того, как было высказано это предположение, выяснилось, что известное нам вещество, состоящее из молекул, атомов и элементарных частиц (барионная материя) составляет не более 4–5% всей материи Вселенной. Оставшуюся долю составляет темное вещество (25%) и темная энергия, или космологический вакуум (70%), природа которых совершенно не ясна. Появились представления о множественности вселенных, о мультиверсе (Земля и Вселенная, 2005, № 3; 2012, № 5). И.С. Шкловский знал об этом, термин “мультиверс” тогда еще не был принят, и он предложил ввести название Большая Вселенная (в отличие от мини-вселенных, в одной из которых живем мы). При нем представления о космологических туннелях (или кротовых норах) еще только зарождались. Еще не были открыты гравитационные волны, ученые не знали о том, что около 7 млрд лет тому назад замедленное расширение Вселенной сменилось ускоренным. Касаясь этого открытия, академик А.М. Черепашук писал: “Современная астрономия ставит серьезные задачи перед фундаментальной наукой. Благодаря астрономии, человечество в последние годы осознало огромную меру незнания окружающего нас мира” (Земля и Вселенная, 2010, № 1). Известный философ Вадим Васильевич Ка-



Член-корреспондент АН СССР И.С. Шкловский. Начало 1980-х гг.

зютинский по поводу открытия темной энергии высказал мысль о том, что речь идет о существовании третьей (после вещества и физических полей) формы материи, лежащей на грани бытия и небытия.

Нет сомнения в том, что, если бы Иосиф Самуилович дожил до этих открытий (умер 3 марта 1985 г. в Москве), он с присущей ему страстностью включился бы в исследование новых свойств Вселенной.

Иосиф Самуилович Шкловский завоевал признание среди астрономов мира как один из самых блестящих лидеров мировой астрофизики. Он был избран членом Лондонского королевского астрономического общества, Американской академии наук и искусств, Национальной академии наук США, Астрономического общества Канады; он – почетный доктор Парижской

обсерватории, награжден почетной Брюсовской медалью Тихоокеанского астрономического общества. Мы уже упоминали, что один из кратеров на поверхности Фобоса назван его именем. Официальное признание научных заслуг И.С. Шкловского в нашей стране – более скромное. Он был лауреатом Ленинской премии (о чем мы уже упоминали). Но его академическая карьера была не вполне успешной. В 1966 г. он избран членом-корреспондентом АН СССР, а академиком его так и не избрали, хотя его ученики стали академиками. Причина – не в том, что его научные заслуги не были оценены по достоинству, ее надо искать в характере Иосифа Самуиловича: он был не только очень талантливым человеком, но яркой неординарной личностью со слож-

ным характером, в котором доброта и обаяние причудливо сочетались с резкостью и нетерпимостью. Ничто человеческое не было ему чуждо. Как заметил Яков Борисович Зельдович, сама личность Шкловского поляризовала окружающих его людей. Его соратники Н.С. Кардашёв и Л.С. Марочник в статье “Феномен Шкловского” отмечают: “он всегда был окружен друзьями и учениками, но его острое разящее слово создавало ему немало врагов”.

И.С. Шкловский оставил яркий след в истории науки, его беспредельная преданность науке может служить хорошим примером для молодого поколения ученых.

*Л.М. ГИНДИЛИС,
кандидат физико-математических наук
ГАИШ МГУ*

Информация

Активное ядро галактики

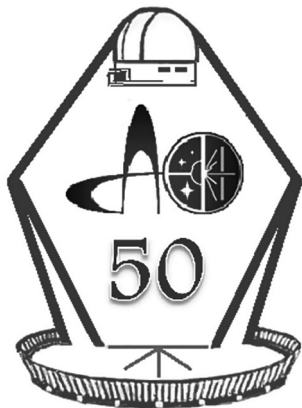
Астрономы с помощью космической обсерватории “Спитцер” и KTX обнаружили достаточно редкое скопление галактик SpARCS1049 + 56 (расстояние – 9,8 млрд св. лет от нас, созвездие Большая Медведица), центр которого буквально разрывается из-за активного звездообразования (см. стр. 1 обложки). Невероятная активность галактик в ядре скопления, вероятно, связана с захватом газопы-

левого облака соседней галактики. Это открытие – это один из первых известных случаев такого способа слияния галактик в ядре скопления. «Обычно в центрах групп галактик звезды очень старые или “мертвые”. Мы считаем, что в гигантской галактике в центре скопления SpARCS1049 + 56 идет бурное звездообразование, произошедшее после слияния с меньшей», – предположил руководитель группы исследователей Т. Уэбб из Университета Макгилла (Канада).

Скопления галактик связаны и сгруппированы друг с другом под действием гравитационного взаимодействия. Млечный Путь входит в “Местную группу галактик”, находящуюся на периферии обширного сверхскопления Ланиакея,

состоящего из 100 тыс. галактик (!). Скопление SpARCS1049 + 56 состоит из 27 членов суммарной массой $4 \times 10^{14} M_{\odot}$. Уникальной эту группу делает ее очень яркое ядро, содержащее в основном новые звезды. В центре большинства массивных скоплений находится одна галактика, в которой в год рождается немного звезд; например, в нашей галактике – только одна или две. В доминирующей галактике в скоплении SpARCS1049 + 56 – наоборот, возникает множество звезд – примерно 860 в год. Ученые пытаются понять, является ли группа SpARCS1049 + 56 изолированной или она может представлять вполне обычный объект ранней Вселенной?

Пресс-релиз NASA,
9 октября 2015 г.



Форум в России по нейтринным сигналам

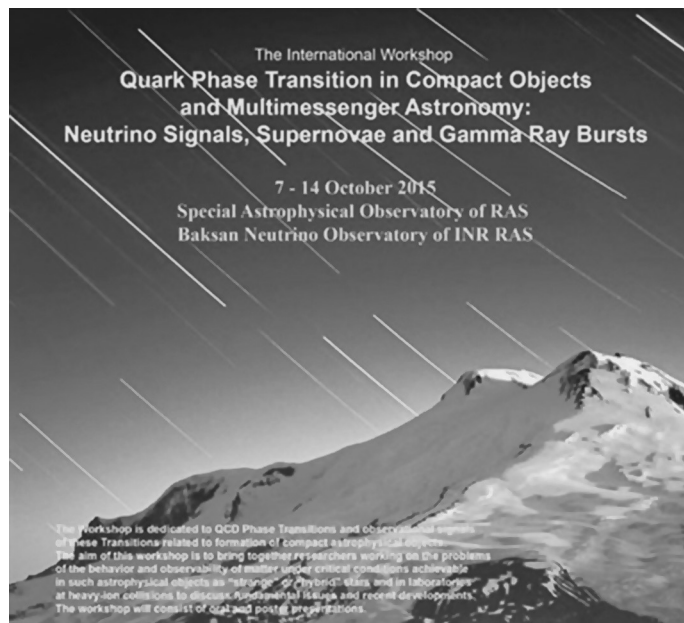
С 7 по 14 октября 2015 г. CAO РАН и Баксанская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований (БНО ИЯИ РАН) провели международное совещание “Кварковый фазовый переход в компактных объектах и многоволновая астрономия: нейтринные сигналы, сверхновые и гамма-всплески” — первое в России научное мероприятие по этой теме. Совещание проходило в два этапа: первые три дня заседания — в поселке Нижний Архыз (Карачаево-Черкесская республика), где находится Обсерватория, а затем участники направились в поселок Терскол (Кабардино-Балкарская республика), где располагается Институт. На совещании присутствовали 52 участника — ученые из российских научных институтов, а также из Германии, Италии, Китая и Польши.

В 2012–2014 гг. по данной тематике уже проведены три специальных конференции в Европе и одна — в Китае.

На открытии с приветствием обратились директор CAO РАН В.В. Власюк, заведующий лабораторией БНО ИЯИ РАН В.Б. Петков и ведущий научный сотрудник CAO РАН В.В. Соколов. Совещание было посвяще-

но проблеме поведения и возможности наблюдения вещества в критических условиях; обсуждались фундаментальные вопросы, докладывали о последних достижениях, была выработана программа совместных исследований.

Астрономы и физики, изучающие вещество со сверхъядерной плот-



Постер совещания.



Участники совещания у входа в лабораторный корпус САО РАН.

ностью, хорошо осознают, что современная наука стоит на пороге открытия совершенно нового состояния вещества — кварк-глюонной плазмы, обнаружения кварковых звезд. Это новое направление в физике высоких энергий и в исследованиях компактных объектов — нейтронных звезд и коллапсаров — кандидатов в черные дыры звездных масс. Фазовый переход в состояние кварк-глюонной плазмы наверняка связан с самим механизмом взрывов массивных сверхновых, а энергия

такого перехода может быть источником космических гамма-всплесков. Сигналами перехода вещества в чисто кварковую материю могут быть нейтрино, которые наблюдаются на современных детекторах, в том числе и на российских — таких, как Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (Земля и Вселенная, 2011, № 1). Для регистрации сигналов фазового перехода совершенствуется аппаратура и на гравитационных детекторах: LIGO (лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория, находящаяся в Ливингстоне, штат Луизиана и в Хэнфорде, штат Вашингтон) и VIRGO (франко-итальянский детектор гравитационных

волн, расположенный в Европейской гравитационной обсерватории в Пизе, Италия). Участие астрономов в программах по исследованию боксов локализации нейтринных событий (и, возможно, гравитационных) сейчас детально обсуждается (Земля и Вселенная, 2016, № 3, с. 36). На эту тему физики уже провели несколько международных семинаров и совещаний за рубежом.

Проведение совещания в местах расположения двух уникальных российских институтов — САО РАН и БНО ИЯИ РАН — было продиктовано характером включенных в его программу вопросов, относящихся к наиболее актуальным проблемам современной астрофизики, в том чис-

С докладом выступает Кристиан Шпиринг – сотрудник исследовательского центра DESY (Германия).

ле к проблеме существования кварк-адронных фазовых переходов и состояния материи при высоких температурах и плотностях. Подобные условия достижимы только в астрофизических объектах – коллапсарах звездных масс – таких, как нейтронные звезды, образование которых связано с коллапсом и взрывом массивных и плотных ядер звезд с образованием сверхновых и выделением гамма-всплесков.

Хотя сверхновые активно исследуются уже давно, на нашем совещании впервые в России была сделана попытка подойти к этому вопросу с охватом всего наблюдательного диапазона, поскольку решение такого рода проблем требует развития методов, комбинирующих оптические астрономические наблюдения с экспериментами на нейтринных телескопах, на установках для регистрации космических лучей и детекторах гравитационных волн. Первая (и пока единственная) сверхновая, от которой было зарегистрировано нейтринное излучение – SN1987A – вспыхнула на расстоянии 50 кпк (163 тыс. св. лет) в сосед-



ней галактике Большое Магелланово Облако. На Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе впервые были зарегистрированы эти нейтринные сигналы, которые наблюдались и на других нейтринных обсерваториях Земли.

Организаторы совещания стремились к тому, чтобы в 38 представленных докладах тема была освещена как можно полнее. Были рассмотрены такие теоретические моменты, как моделирование сверхновых, прото-нейтронные и нейтронные звезды, уравнение состояния плотного вещества, остывание нейтронных звезд, нестабильные режимы, нуклеосинтез, взрывные переходы и кварк-глюонная плазма. Была затронута и наблюдательская сторона вопроса, к которой относятся оптическая, радио- и рентгеновская астро-

номия, гамма-всплески, гравитационные волны; обнаружение нейтрино, столкновения тяжелых ионов.

В частности, обсуждались экзотические свойства сжатого барионного вещества, гравитационные волны, сценарии происхождения гамма-всплесков, поиски нейтрино от массивных сверхновых, свойства компактных объектов – пульсаров и кандидатов в черные дыры, оптические наблюдения транзитных источников. Ученые затронули проблемы современного состояния больших проектов, направленных на поиски нейтрино и гравитационных волн. Речь шла о необходимости объединения усилий наблюдателей, работающих в разных диапазонах длин волн – оптика, гамма-излучение, рентген, нейтрино, гравитационные

волны (multi-messenger astronomy – всеволновая астрономия), а именно чтобы сигналы, которые поступают о каких-то новых событиях в нейтринной и гравитационной астрономии, тут же поступали для анализа и на оптические телескопы CAO РАН.

Остановимся на нескольких наиболее интересных выступлениях.

В докладе “Астрономия высокоэнергичных нейтрино – где мы сейчас и куда мы идем?” сотрудник исследовательского центра DESY (Немецкий электронный синхротрон, расположенный в Гамбурге и Цойтене) **К. Шпиринг** подчеркнул, что обнаружение астрофизических нейтрино приоткрыло новое наблюдательное окно во Вселенную. Внедрение новейшего поколения детекторов направлено на то, чтобы широко “распахнуть” это окно. Он описал результаты, полученные в экспери-

менте IceCube («Ледяной куб», нейтринная обсерватория, построенная на антарктической станции Амудсен-Скотт; расположена подо льдом, на глубине 1450–2450 м), рассказал о новых будущих детекторах размером в несколько кубических километров: KM3NeT в Средиземном море, GVD на озере Байкал и IceCube-Gen2 на Северном полюсе.

Доктор физико-математических наук **Д.К. Надёжин** (ИТЭФ, Москва) рассказал о современном статусе теории механизма взрыва сверхновых.

Профессор **В.Б. Петков** (БНО ИЯИ РАН) описал перспективы обнаружения кварковых фазовых переходов при вспышке нейтрино в галактических сверхновых с помощью сцинтилляционных детекторов размером порядка 20 кило тонн.

Доктор физико-математических наук **В.Н. Ру-**

денко (ГАИШ МГУ) познакомил аудиторию с современным состоянием эксперимента по обнаружению гравитационных волн. В своем докладе он подчеркнул важность многоволновой астрономии в этом вопросе.

В докладе “Рентгеновские двойные и ультраяркие рентгеновские источники” сотрудник Варшавского университета **Г. Викторovich** особо остановился на “проблеме пробела в распределении масс компактных источников” и рассказал об одном из вариантов ее возможного решения.

Китайский ученый из Пекинского университета **Жень Синь Сю** привел аргументы в пользу того, что, в отличие от обычного барионного вещества, содержащего u - и d -кварки, компактные звезды могут содержать вещество из кварков трех ароматов – u , d и s .

Исследователь из университета китайского города Нанкин **Ю Йонг-Бо** предложил модель “впрыскивания энергии”, в которой двухкомпонентный джет и механизм микрофизических вариаций могут объяснить факт повторного оптического “пооярчания” гамма-всплесков.



На экскурсии на Большой подземный сцинтилляционный телескоп (BUST) Баксанской нейтринной обсерватории.

Итальянский ученый **А. Драго** из университета Феррары в своем докладе описал два класса сценариев, в которых адронные звезды с массой, не превосходящей $1,5 M_{\odot}$, могут сосуществовать с кварковыми звездами (их масса может значительно превышать $2 M_{\odot}$), а также те последствия, которые эти сценарии могут иметь для

длинных и коротких гамма-всплесков.

Программа совещания была очень насыщенной. Помимо научных заседаний и оживленных дискуссий, участники с большим интересом ознакомились с главными наблюдательными инструментами “принимающих” институтов – 6-м оптическим телескопом БТА и радиотелескопом РАТАН-600 в САО РАН

и Подземным скинтилляционным телескопом в БНО ИЯИ РАН. С большим удовольствием был воспринят концерт ансамбля национального танца “Эльбрус”.

Подробную информацию о совещании можно получить по ссылке: http://www.sao.ru/hq/grb/conf_2015/index-ru.html.

*В.В. СОКОЛОВ,
доктор физико-математических наук*

Информация

Зародыши сверхмассивных черных дыр

В центрах почти всех галактик находятся сверхмассивные черные дыры – объекты, масса которых измеряется миллионами и даже миллиардами солнечных. Но как именно сформировались эти гиганты? Согласно одной из версий, они возникли из образовавшихся после коллапса звезд первого поколения черных дыр, которые за последующие миллиарды лет активного поглощения вещества превратились в сверхмассивные. Но тут возникает проблема. К настоящему времени космические обсерватории смогли получить изображения первых галактик, возникших через несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва (Земля и Вселенная, 2013, № 1, с. 76; 2015, № 5, с. 108).

В некоторых из них обнаружены сверхмассивные черные дыры. Проблема в том, что за такое короткое (по астрономическим меркам) время черные дыры не могут поглотить так много вещества, чтобы вырасти до таких размеров. Существуют альтернативные теории образования сверхмассивных черных дыр: в сверхплотной материи в момент Большого взрыва; с участием темной материи; вырастают из черных дыр массой $10\text{--}100 M_{\odot}$ при коллапсе массивной звезды; из гигантских газовых облаков в ранней Вселенной. Последняя получила подтверждение.

Недавно коллектив итальянских астрофизиков, используя новый метод обработки данных: компьютерные модели черной дыры, глубокие обзоры неба и снимки космических обсерваторий “Чандра”, “Спитцер” и КТХ идентифицировал два внегалактических объекта, которые сформировались менее чем через 500 млн лет после Большого взрыва и имеют первоначальную массу свы-

ше $10^5 M_{\odot}$. По их мнению, они могут быть зародышами сверхмассивных черных дыр, образовавшихся при коллапсе газового облака. Один из них, OJ29323 в созвездии Большой Медведицы, в 212 тыс. св. лет от нас, – источник рентгеновского излучения, обладающий необычным ИК-спектром (см. стр. 3 обложки). Скорость звездообразования в нем примерно $2 \times 10^3 M_{\odot}$ в год, что невозможно. В то же время их спектр полностью совпадает с теоретическими характеристиками газового облака, где и происходит гравитационный коллапс. Пока нельзя утверждать, что найденные объекты действительно являются зародышами сверхмассивных черных дыр. Для того, чтобы прояснить их природу, потребуются многочисленные дополнительные наблюдения. Считается, что эти объекты свидетельствуют в пользу теории формирования сверхмассивных черных дыр из газовых облаков.

Пресс-релиз NASA,
24 мая 2016 г.

НЕБЕСНЫЙ КАЛЕНДАРЬ: ноябрь–декабрь 2016 г.

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ

Дата	Время, ч	Событие
Ноябрь		
2	20	Луна проходит в 3° севернее Сатурна
6	9	Луна проходит в 4° севернее Марса
7	19	Луна в первой четверти
14	11	Луна в перигее
14	13	Полнолуние
15	17	Покрытие Луной звезды Альдебаран (α Тельца)
20	10	Нептун переходит от попятного движения к прямому
21	8	Луна в последней четверти
25	3	Луна проходит в 1° севернее Юпитера
27	20	Луна в апогее
29	12	Новолуние
Декабрь		
3	10	Луна проходит в 5° севернее Венеры
5	8	Луна проходит в 2° севернее Марса
7	8	Луна в первой четверти
10	11	Сатурн в соединении с Солнцем
10	21	Меркурий в наибольшей восточной элонгации (21°)
12	23	Луна в перигее
14	0	Полнолуние
14	—	Максимум метеорного потока Геминиды
19	3	Меркурий переходит от прямого движения к попятному
21	1	Луна в последней четверти
21	10	Зимнее солнцестояние
22	18	Луна проходит в 2° севернее Юпитера
25	6	Луна в апогее
28	18	Меркурий в нижнем соединении с Солнцем
29	6	Новолуние
29	16	Уран переходит от попятного движения к прямому

Примечание. Во всех таблицах и в тексте дано Всемирное время (UT), кроме особо оговоренных случаев.

ЭФЕМЕРИДА СОЛНЦА

Дата	α		δ		45°		55°		65°	
					восход	заход	восход	заход	восход	заход
	ч	м	°	'	ч: м	ч: м	ч: м	ч: м	ч: м	ч: м
Ноябрь 1	14	26	–14	25	06:40	16:51	07:05	16:26	07:50	15:41
11	15	05	–17	25	06:53	16:39	07:25	16:07	08:24	15:08
21	15	47	–19	54	07:07	16:29	07:45	15:51	08:59	14:37
Декабрь 1	16	29	–21	48	07:19	16:23	08:02	15:40	09:32	14:10
11	17	13	–23	00	07:29	16:21	08:16	15:34	09:58	13:52
21	17	57	–23	26	07:36	16:24	08:24	15:36	10:12	13:48
31	18	41	–23	09	07:39	16:30	08:26	15:43	10:10	14:00

Примечание. В таблице дано среднее солнечное время.

Пример. Определить время захода Солнца 4 ноября 2016 г. в Ростове-на-Дону (широта – $47^{\circ} 17'$, долгота – $2^{\text{ч}} 39^{\text{м}}$, 2-я часовая зона – московское время UT + $3^{\text{ч}}$). Пользуясь Таблицей II, интерполируем по широте значение времени захода Солнца на 4 ноября, получаем $16^{\text{ч}} 42^{\text{м}}$. Вычтем из него долготу места, прибавим $3^{\text{ч}}$, получим $17^{\text{ч}} 03^{\text{м}}$.

Таблица III

ЭФЕМЕРИДЫ ПЛАНЕТ

Дата		α		δ		m	d	F	Продолжительность видимости для раз- ных широт, ч			Период видимо- сти
		ч	м	°	'				45°	55°	65°	
Меркурий												
Ноябрь	1	14	36,3	−15	15	−1,3	4,6	1,00	—	—	—	Вечер
	11	15	39,0	−20	35	−0,7	4,7	0,97	—	—	—	
	21	16	43,1	−24	13	−0,5	5,0	0,93	—	—	—	
Декабрь	1	17	47,3	−25	48	−0,5	5,5	0,83	—	—	—	Вечер
	11	18	43,4	−25	04	−0,5	6,6	0,63	0,3	—	—	
	21	19	03,7	−22	37	0,8	8,6	0,22	—	—	—	
	31	18	18,2	−20	28	4,0	9,8	0,03	—	—	—	
Венера												
Ноябрь	1	16	59,8	−24	27	−4,0	14,1	0,78	1,8	1,1	—	Вечер
	11	17	52,6	−25	31	−4,0	14,9	0,75	2,2	1,6	—	Вечер
	21	18	45,4	−25	22	−4,1	15,9	0,72	2,6	2,2	—	Вечер
Декабрь	1	19	37,0	−24	01	−4,2	17,0	0,69	3,1	2,9	1,0	Вечер
	11	20	26,3	−21	35	−4,3	18,3	0,65	3,5	3,5	2,9	Вечер
	21	21	12,7	−18	15	−4,3	19,8	0,61	3,9	4,1	4,4	Вечер
	31	21	55,8	−14	13	−4,4	21,7	0,57	4,2	4,6	5,5	Вечер

Таблица III (окончание)

Дата	α		δ		m	d	F	Продолжительность видимости для раз- ных широт, ч			Период видимос- ти	
	ч	м	°	'				45°	55°	65°		
Марс												
Ноябрь 1	19	44,0	−23	15	0,4	7,5	0,86	4,2	3,5	1,4	Вечер	
11	20	14,8	−21	39	0,5	7,1	0,87	4,3	3,9	2,5	Вечер	
21	20	45,3	−19	42	0,5	6,8	0,87	4,5	4,3	3,4	Вечер	
Декабрь 1	21	15,3	−17	25	0,6	6,5	0,88	4,6	4,5	4,1	Вечер	
11	21	44,8	−14	53	0,7	6,2	0,89	4,6	4,7	4,7	Вечер	
21	22	13,7	−12	07	0,8	6,0	0,89	4,6	4,8	5,1	Вечер	
31	22	42,0	−09	12	0,9	5,7	0,90	4,5	4,8	5,3	Вечер	
Юпитер												
Ноябрь 1	12	42,1	−03	18	−1,5	31,2	1,00	2,3	2,6	3,0	Утро	
11	12	49,4	−04	04	−1,6	31,6	1,00	3,1	3,4	4,0	Утро	
21	12	56,4	−04	47	−1,6	32,2	1,00	3,8	4,3	5,1	Утро	
Декабрь 1	13	03,0	−05	26	−1,6	32,8	1,00	4,6	5,1	6,0	Утро	
11	13	09,0	−06	01	−1,7	33,6	0,99	5,3	5,9	6,9	Утро	
21	13	14,3	−06	31	−1,7	34,4	0,99	6,0	6,5	7,6	Утро	
31	13	18,8	−06	56	−1,8	35,4	0,99	6,6	7,1	8,1	Утро	
Сатурн												
Ноябрь 1	16	51,9	−21	09	0,5	15,4	1,00	1,0	—	—	Вечер	
11	16	56,5	−21	17	0,5	15,3	1,00	0,5	—	—	Вечер	
21	17	01,3	−21	25	0,5	15,2	1,00	—	—	—		
Декабрь 1	17	06,2	−21	33	0,5	15,1	1,00	—	—	—		
11	17	11,3	−21	40	0,4	15,1	1,00	—	—	—		
21	17	16,3	−21	46	0,5	15,1	1,00	—	—	—		
31	17	21,3	−21	51	0,5	15,2	1,00	—	—	—		

Примечание. Координаты даны на момент 0^ч по Всемирному времени, F – фаза планеты.

ВИДИМОСТЬ ПЛАНЕТ

Меркурий в ноябре не видим. 10 декабря ближайшая к Солнцу планета окажется в наибольшей восточной элонгации (21°) и его можно будет видеть не более 0,3 ч на юге нашей страны в течение нескольких вечеров. Блеск Меркурия в это время −0,5^м, видимый угловой диаметр – 6,6", он перемещается по созвездию Стрельца. Меркурий 19 декабря переходит от прямого движения к попятному, 28 декабря будет находиться в нижнем соединении с Солнцем.

Венера в ноябре – декабре видна в вечернее время и постепенно удаляется от Солнца. Она перемещается сначала по созвездию Змееносца, 9 ноября переходит в созвездие Стрельца и 7 декабря в созвездие Козерога. В ноябре Венера видна в средних и южных районах России, а в декабре – уже на всех широтах. Продолжительность видимости планеты увеличивается: на средних и южных широтах с 1,1–1,8 ч в начале ноября до 4,6–4,2 ч в конце декабря.

В ноябре в северных широтах Венера не видна, в декабре продолжительность ее видимости увеличивается – с 1,0 ч 1 декабря до 5,5 ч 31 декабря. Она постепенно становится ближе к Земле, ее видимый угловой диаметр увеличивается – с 14,1" до 21,7", блеск возрастает с $-4,0^m$ до $-4,4^m$. Луна пройдет 3 декабря недалеко от Венеры.

Марс в начале ноября перемещается по созвездию Стрельца, 8 ноября переходит в созвездие Козерога, 15 декабря в созвездие Водолея и видим по вечерам. Продолжительность видимости планеты в южных широтах нашей страны растет с 4,2 ч до 4,6 ч, в средних широтах – с 3,5 ч в начале ноября до 4,8 ч в конце декабря, в северных широтах – с 1,4 ч до 5,3 ч. Марс продолжает удаляться от Земли, его видимый угловой диаметр уменьшается с 7,5" в начале ноября до 5,7" в конце декабря, блеск снижается с $0,4^m$ до $0,9^m$. Луна прой-

дет 6 ноября и 5 декабря недалеко от Марса.

Юпитер в ноябре – декабре виден утром, он перемещается по созвездию Девы, продолжительность его видимости увеличивается с 2,3–3,0 ч до 6,6–8,1 ч в зависимости от широты места наблюдения. Видимый угловой диаметр планеты-гиганта увеличивается с 31,2" до 35,4", блеск растет с $-1,5^m$ до $-1,8^m$. Луна пройдет 25 ноября и 22 декабря недалеко от Юпитера.

Сатурн в начале ноября еще можно видеть непродолжительное время по вечерам в созвездии Змееносца только на южных широтах нашей страны. Блеск планеты-гиганта в это время будет $0,5^m$, видимый угловой диаметр – 15,4". Сатурн в соединении с Солнцем 10 декабря. Луна пройдет 2 ноября недалеко от Сатурна.

МЕТЕОРНЫЙ ПОТОК ГЕМИНИДЫ

14 декабря ожидается максимум метеорного потока **Геминиды**, который можно наблюдать 9–19 декабря. Радиант потока расположен в северной части созвездия Близнецов, около его двух самых ярких звезд – Кастора и Поллукса. Средний радиант потока: $\alpha = 112,5^\circ$, $\delta = +36,2^\circ$, скорость метеоров – 35 км/с. Геминиды связаны с астероидом 3200 Фазтон (1983 ТВ). Для наблюдателей в Северном полу-

шарии радиант расположен над горизонтом практически все темное время суток. Во время максимума потока Луна находится в полнолунии и будет мешать наблюдениям. Зенитное часовое число метеорного потока – около 80 метеоров. Часто встречаются яркие метеоры и болиды. В 2015 г. максимальное зенитное часовое число достигло 185 метеоров. Интересно, каким оно будет в 2016 г.?

*В.И. ЩИВЬЁВ
г. Балашиха,
Московская область*

Дорогие читатели!

*Напоминаем, что подписаться на журнал
“Земля и Вселенная” вы можете с любого
номера по Объединенному каталогу
“Пресса России”
(II полугодие 2016 г.) во всех отделениях связи.
Подписаться можно и по Интернету,
воспользовавшись каталогом журналов
на сайте Почта России.
Подписной индекс – 70336.*

Заведующая редакцией Л.В. Рябцева
Зав. отделом космонавтики и геофизики С.А. Герасютин
Художественные редакторы О.Н. Никитина, М.С. Вьюшина
Оператор ПК Н.Н. Токарева
Корректор Т.И. Шеповалова
Обложку оформила О.Н. Никитина

Сдано в набор 13.07.2016. Подписано в печать 08.08.2016. Дата выхода в свет 23.09.2016

Формат $70 \times 100^{1/16}$ Цифровая печать
Уч.-изд.л. 12,3 Усл. печ.л. 9,1 Усл.кр.-отт. 2,5 тыс. Бум.л. 3,5
Тираж 263 Зак. 478 Цена свободная

Учредители: Российская академия наук, Президиум

Издатель: ФГУП «Издательство «Наука»

117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

Адрес редакции: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90

Телефон: (495) 276-77-28 доб. 42-31, или 42-32

E-mail: zevs@naukaran.com

Оригинал-макет подготовлен ФГУП «Издательство «Наука»

Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука» (Типография «Наука»)

121099, Москва, Шубинский пер., 6

